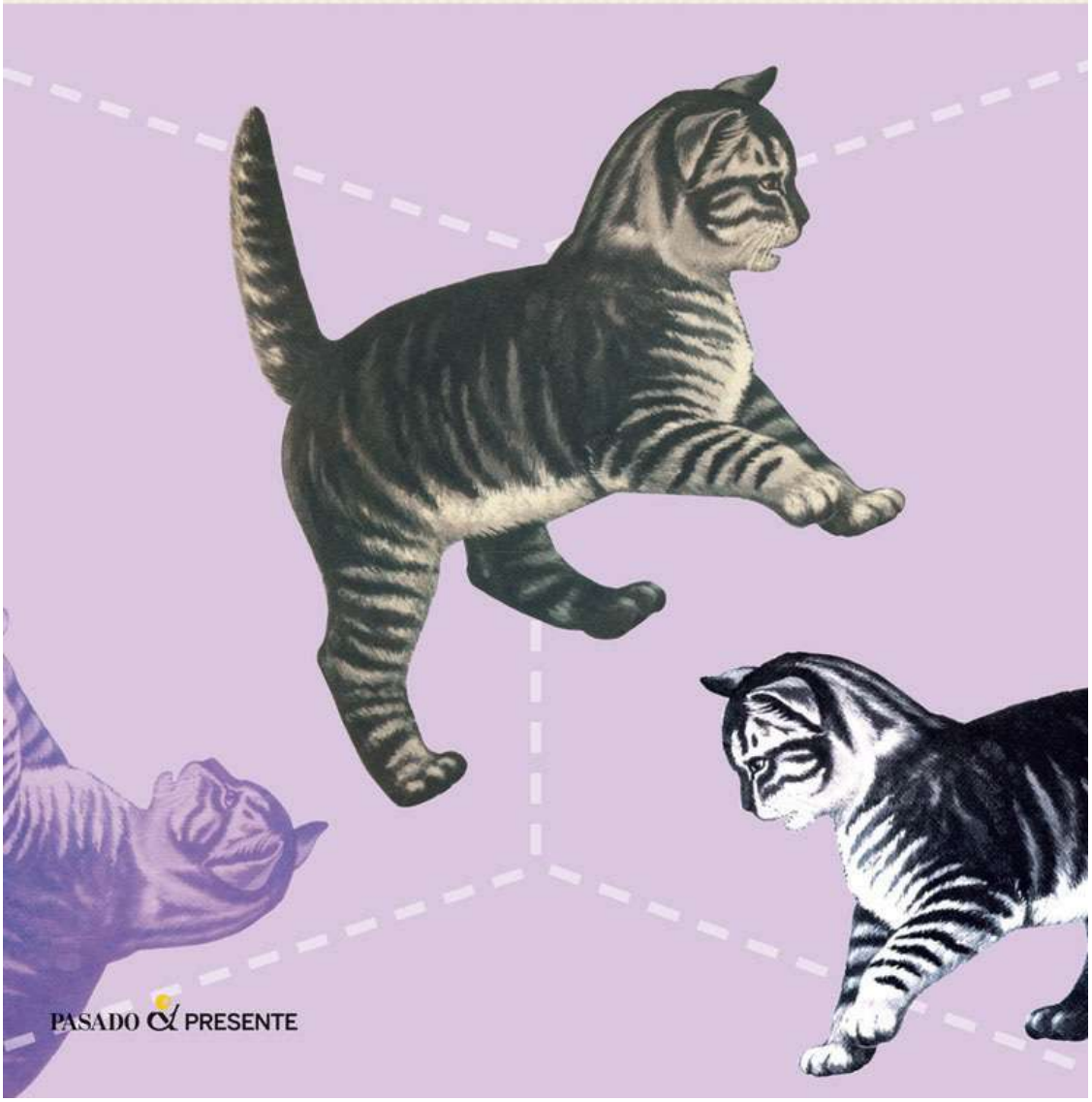
JOSÉ MANUEL
SÁNCHEZ RON

EL MUNDO DESPUÉS DE LA REVOLUCIÓN

LA FÍSICA DE LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XX

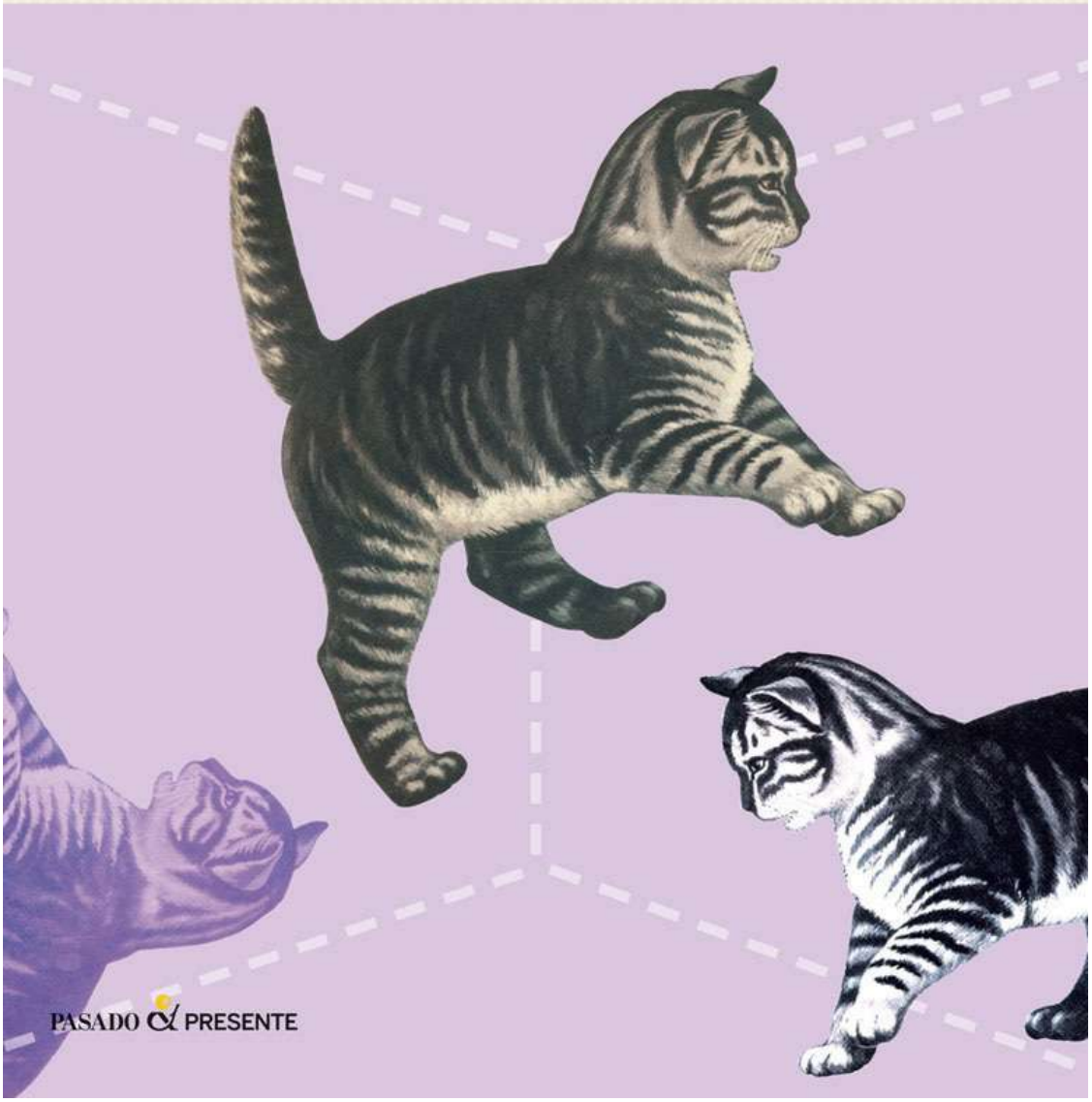


PASADO & PRESENTE

JOSÉ MANUEL
SÁNCHEZ RON

EL MUNDO DESPUÉS DE LA REVOLUCIÓN

LA FÍSICA DE LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XX



PASADO & PRESENTE

Índice

Portada

Índice

Dedicatoria

INTRODUCCIÓN

1. REVOLUCIONES EN LA FÍSICA

EL GERMEN DE UNA REVOLUCIÓN: DE MAXWELL A LORENTZ

LA REVOLUCIÓN: LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

UN MUNDO DE CUATRO DIMENSIONES

LA REVOLUCIÓN SE EXTIENDE: LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD

COSMOLOGÍA

LA IMPORTANCIA DE LA TECNOLOGÍA: NUEVOS TELESCOPIOS PARA OBSERVAR EL UNIVERSO

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO: VESTO SLIPHER Y EDWIN HUBBLE

RELATIVIDAD Y FILOSOFÍA

UNA NUEVA REVOLUCIÓN: LA FÍSICA CUÁNTICA

LA REVOLUCIÓN (CUÁNTICA) SE EXTIENDE: LA QUÍMICA CUÁNTICA

PAUL A. M. DIRAC: FÍSICA, MATEMÁTICAS Y «BELLEZA»

REVOLUCIONES DENTRO DE UNA REVOLUCIÓN: LA ECUACIÓN DE DIRAC Y LA ANTIMATERIA

PARTÍCULAS ELEMENTALES, YUKAWA Y LA FUERZA NUCLEAR

UNA NOTA SOBRE JAPÓN

LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA, LA SEGUNDA CUANTIZACIÓN, RENORMALIZACIÓN Y LA TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

LA FÍSICA ESTADOUNIDENSE Y LA TRADICIÓN EMPÍRICA

RICHARD FEYNMAN, PUENTE DE UNIÓN ENTRE LAS DOS MITADES DEL SIGLO XX

2. GRAVITACIÓN Y UNIVERSO

I. ¿UNIVERSO ETERNO O SEMPITERNO? EL NACIMIENTO DE LA RADIOASTRONOMÍA

EL ORIGEN COSMOLÓGICO DEL TIEMPO Y LOS PROBLEMAS DE SU VERIFICACIÓN

LA COSMOLOGÍA DEL ESTADO ESTACIONARIO

DEL RADAR A LA RADIOASTRONOMÍA

LA RADIOASTRONOMÍA Y LA COSMOLOGÍA DEL ESTADO ESTACIONARIO

INTERLUDIO: LAS TELECOMUNICACIONES, LA GUERRA FRÍA Y EL «SPUTNIK»

LA CONSOLIDACIÓN DEL «BIG BANG»: EL FONDO DE RADIACIÓN DE MICROONDAS

CUÁSARES

PÚLSARES Y ESTRELLAS DE NEUTRONES

II. NUEVA VIDA PARA LA RELATIVIDAD GENERAL

BÚSQUEDA DE UNA TEORÍA DEL CAMPO UNIFICADO

ALBERT EINSTEIN: LA IRRESISTIBLE ATRACCIÓN DE LAS MATEMÁTICAS

OTROS MATEMÁTICOS «RELATIVISTAS»

LA RELATIVIDAD, UNA FÍSICA «POCO INTERESANTE»

UN VIEJO MUNDO NUEVO: SINGULARIDADES EN EL ESPACIO-TIEMPO RELATIVISTA

INTERLUDIO: MATEMÁTICAS Y FÍSICA

LOS AGUJEROS NEGROS: DINÁMICA Y REALIDAD FÍSICA

RADIACIÓN GRAVITACIONAL Y LENTES GRAVITACIONALES

III. NUEVAS VENTANAS ABIERTAS AL UNIVERSO

NUEVOS INSTRUMENTOS ASTRONÓMICOS

INFLACIÓN

ARRUGAS EN EL TIEMPO

MATERIA Y ENERGÍA OSCURAS

PLANETAS EXTRASOLARES

3. EL MUNDO CUÁNTICO

I. PARTÍCULAS «ELEMENTALES»: LA FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

ROLF WIDERÖE, ERNEST LAWRENCE Y EL CICLOTRÓN

SOCIOPOLÍTICA DE LA FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

NUEVOS ACELERADORES, NUEVOS ELEMENTOS, NUEVAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

EL CERN

PARTÍCULAS Y MÁS PARTÍCULAS: LOS QUARKS COMO «PRINCIPIO UNIFICADOR»

EL DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRINO

LA SAGA DE LAS SIMETRÍAS: «LA SIMETRÍA DICTA LA INTERACCIÓN»

TEORÍAS DE UNIFICACIÓN

PSICO-¿PATOLOGÍA? MORAL DEL FÍSICO NUCLEAR Y DE ALTAS ENERGÍAS

II. ENTRELAZAMIENTO Y MULTIUNIVERSOS

EL ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO

MULTIUNIVERSOS

III. FENÓMENOS CUÁNTICOS MACROSCÓPICOS

CONDENSADOS DE BOSE-EINSTEIN Y SUPERFLUIDEZ

SUPERCONDUCTIVIDAD

IV. HIJOS DE LA FÍSICA CUÁNTICA: CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN EL MUNDO CUÁNTICO

CHIPS Y CIRCUITOS INTEGRADOS

MICROSCOPIOS Y NANOTECNOLOGÍA

MÁSERES Y LÁSERES

4. Y LA FÍSICA CAMBIÓ EL MUNDO

LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN

INTERNET Y LA «WORLD WIDE WEB»

ENERGÍA NUCLEAR (I): POLÍTICA

ENERGÍA NUCLEAR (II): INDUSTRIA

FÍSICA Y FÍSICOS EN LAS CIENCIAS DE LA VIDA

EL REINO DE LAS IMÁGENES

MEDICINA NUCLEAR

DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN EL LABORATORIO CAVENDISH

FÍSICOS EN BIOLOGÍA (1): NIELS BOHR Y MAX DELBRÜCK

FÍSICOS EN BIOLOGÍA (2): ERWIN SCHRÖDINGER, TEÓRICO DE LA VIDA

FÍSICOS EN BIOLOGÍA (3): FRANCIS CRICK, DE LA FÍSICA A LA BIOLOGÍA

LA ESTRUCTURA DEL ADN

LA FÍSICA, UNA CIENCIA INTERDISCIPLINAR

EL OJO QUE NOS ACOMPAÑA: EL GPS

FÍSICA Y GEOLOGÍA: LA TECTÓNICA DE PLACAS

LA FÍSICA NO LINEAL

LA FÍSICA Y LA EXTINCIÓN DE LOS DINOSAURIOS

EPÍLOGO

BIBLIOGRAFÍA

ÁLBUM FOTOGRÁFICO

NOTAS

CRÉDITOS

Para Arturo Pérez-Reverte,

ciudadano noble y valiente.

Y amigo muy querido.

INTRODUCCIÓN

Gracias a las estructuras triunfantes de la investigación y la teoría científica, el siglo XX será recordado como una era de progreso y no únicamente de tragedias humanas.

ERIC HOBSBAWM (2012: 550)

Nací en 1949, y aunque ya llevó vividos casi tres lustros del siglo XXI mi siglo es y será, básicamente, el XX. Cuando comencé mi camino por la vida, en lo que entonces era un oscuro país, España, ya habían tenido lugar algunas de las grandes revoluciones del siglo: las asociadas a las dos guerras mundiales (1914-1918 y 1939-1945), la revolución rusa de octubre de 1917, que dio origen a la Unión Soviética, y las dos revoluciones científicas, la relativista y la cuántica (no así la biológico-molecular y médica, que fue alumbrada con fuerza a partir de 1953, con el descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN, la molécula de la herencia y, por tanto, de la vida). La revolución rusa, que tanto prometió —baste recordar aquellas hermosas frases de Karl Marx (Crítica del programa de Gotha, 1875): «De cada cual, según sus capacidades; a cada cual, según sus necesidades», que los verdaderos revolucionarios de entonces buscaban cumplir–, terminó prostituyéndose y difuminándose, independientemente de que sus consecuencias aún afecten, y ayuden a comprender el mundo actual, lo mismo que sucede con las dos guerras mundiales, sin las cuales no es posible entender la configuración geopolítica mundial. Sin embargo, según vaya transcurriendo el tiempo, es de suponer que el «recuerdo», la «presencia» de esas revoluciones políticas irá disminuyendo hasta terminar siendo un capítulo de los libros de historia, como ahora lo son, por mucho que algunos pretendan lo contrario, hechos que tuvieron lugar hace siglos.[1] No quiero decir, naturalmente, que esas revoluciones, u otros hechos históricos de importancia en el pasado, no hayan configurado la historia: esta no sería la misma sin las Revoluciones Americana y Francesa, sin lo que sucedió en

la Grecia de Homero, Sócrates, Aristóteles, Plutarco, Heródoto o Pericles, o en la Roma de Julio César o de Constantino; sin las empresas que acometió Alejandro Magno o si no hubiera existido un revolucionario llamado Jesús de Nazaret, o Jesucristo, que millones y millones de personas consideraron y aún consideran «hijo de Dios», o su «encarnación». Y tantos ejemplos más. Por «configurar la historia», quiero decir que hacen que esta, la historia, cambie de dirección, tome otras rutas dentro de la pluralidad de caminos que, al igual que la evolución de la vida, puede seguir. La historia es, en efecto, similar a cómo ha evolucionado, cómo se ha desarrollado, la vida en la Tierra, un fruto, según nos enseñó Charles Darwin en su inmortal libro de 1859, On the Origin of Species, del azar y la necesidad; el azar de la contingencia y la necesidad de no violentar las leyes de la naturaleza. Ahora bien, esos acontecimientos históricos determinaron el futuro, pero no fueron inevitables, y por consiguiente no se pueden asimilar a leyes universales: el emperador Constantino pudo no haber hecho oficial la religión cristiana en 313, y acaso una parte significativa de la historia posterior del mundo habría sido diferente, muy diferente.

Soy consciente, por supuesto, que es posible pensar que existen unas leyes universales, o mejor, un «orden natural», en el devenir sociohistórico; esto es, que las leyes universales no se dan únicamente en los fenómenos naturales. En su espléndido y conmovedor libro, Rights of Man (1791), Thomas Paine (1737-1809), un revolucionario donde los haya habido —y autor de otro libro inolvidable, Common Sense (1776)— expresó esta idea de la manera siguiente (Paine 1994: 114):

Lo que en el pasado se llamaron Revoluciones, eran poco más que un cambio de personas, o una modificación de circunstancias locales. Surgían y desaparecían como esas situaciones eventuales, que no tienen nada en su existencia o en su destino que pueda influir más allá del lugar en el que se produjeron. Pero lo que ahora vemos en el mundo, en las Revoluciones de América y Francia, constituye una renovación del orden natural de las cosas, un sistema de principios tan universal como la verdad y la existencia del hombre, y combinan moral con felicidad política y prosperidad nacional.

Los principios, las leyes de ese «orden natural de las cosas», eran para Paine

tres:

I. Los hombres han nacido, y continuarán siempre, libres, e iguales con respecto a sus derechos. Las distinciones civiles, por consiguiente, solo se pueden basar en la utilidad pública.

II. El fin de toda asociación política es la preservación de los derechos, naturales e imprescriptibles, del hombre; y estos derechos son libertad, prosperidad, seguridad y resistencia a la opresión.

III. La Nación es esencialmente la fuente de toda Soberanía; ningún INDIVIDUO, o NINGÚN GRUPO DE HOMBRES, puede adjudicarse una autoridad que no derive expresamente de ella.

Son, ¿cómo negarlo?, leyes hermosas, ante las cuales nos sentimos inclinados a pensar —como hicieron otros filósofos que asumieron la existencia de «derechos naturales»— que son inevitables, principios universales que terminarán haciéndose realidad. Pero, ¿es así? Si, hermanados como estamos con toda la vida que existe o ha existido en la Tierra, entendemos la vida, de la que nuestra especie forma parte, bajo el trasluz que nos proporcionó Darwin, si contemplamos las idas y venidas de la historia, de los sistemas sociales que se han implantado, y aun reconociendo que, efectivamente, existe una tendencia hacia ese benéfico, más justo, «orden natural», entonces surgen dudas acerca de la existencia de leyes universales a las que se deben ajustar las sociedades humanas.

La ciencia posee un carácter diferente: las revoluciones científicas —así como, de manera menos radical, el desarrollo normal de la ciencia— desvelan leyes universales de la naturaleza. Y aunque esas revoluciones estén condenadas, al menos hasta ahora, a ser superadas en el futuro, permanecen en formas que las revoluciones políticas o sociales no lo hacen. El sistema matemático que elaboró Euclides, la ley de caída de los cuerpos que encontró Galileo Galilei, las leyes del movimiento y de la gravitación que estableció Isaac Newton, la teoría microbiana de la enfermedad que desarrollaron Louis Pasteur y Robert Koch, la cuantificación introducida por Max Planck, la relatividad especial de Albert Einstein, la teoría de la tectónica de placas y tantos y tantos ejemplos más, nos

desvelan rasgos inevitables (aunque no sepamos por qué) de la Naturaleza. Desde este punto de vista, es fácil comprender lo que escribió el exquisito matemático inglés Godfrey Harold Hardy en un hermoso libro, A Mathematician's Apology (1940; Hardy 1999: 82-83):

Como la historia prueba abundantemente, los logros en matemáticas, independientemente de su valor intrínseco, son los más perdurables. Podemos ver esto incluso en civilizaciones protohistóricas. Las civilizaciones babilónica y asiria han perecido; Hammurabi, Sargón y Nabucodonosor son hoy nombres vacíos, pero las matemáticas babilónicas son todavía interesantes y el sistema sexagesimal de numeración se utiliza todavía en astronomía. Aunque, por supuesto, el ejemplo crucial nos lo proporcionan los griegos. Los griegos son los primeros matemáticos, todavía hoy «vigentes» entre nosotros. Las matemáticas orientales pueden ser una curiosidad interesante, pero las matemáticas griegas son la auténtica realidad. Los griegos utilizaron por primera vez un lenguaje matemático que todavía los matemáticos de hoy pueden entender. Arquímedes será recordado cuando Esquilo haya sido olvidado, porque las lenguas mueren y las ideas matemáticas no.

Viene todo esto a cuento porque es preciso ser cuidadoso con el término «revoluciones», sobre el que tanto se ha escrito y escribirá.[2] En este libro me voy a ocupar de revoluciones científicas —en concreto de las que tuvieron lugar en la física durante el siglo XX—, pero no lo voy a hacer en un sentido clásico, como, por ejemplo, lo hizo Thomas S. Kuhn (1962) en su libro: The Structure of Scientific Revolutions. En él Kuhn ofreció una visión del desarrollo de la ciencia muy atractiva —arrebatadoramente atractiva, se podría incluso decir—, y que sin duda contiene numerosos puntos de verdad, pero su idea de lo que son las «revoluciones» científicas adolece de limitaciones. Por un lado, tenemos que algunas de sus caracterizaciones de revoluciones son dudosas: no está claro, por ejemplo, que la «revolución copernicana», a la que incluso dedicó un libro (Kuhn 1957) anterior a The Structure, merezca ese nombre, el de Copérnico. La idea de que los movimientos celestes estuvieran centrados en el Sol y no en la Tierra, tenía antecedentes lejanos, en la antigua Grecia; fue sobre todo Johannes Kepler quien introdujo elementos más exclusivos y esenciales —las órbitas elípticas— en la nueva visión del cosmos. Es cierto, por supuesto, que De

revolutionibus orbium coelestium (1543) constituyó un acontecimiento fundamental, muy influyente, para abandonar la cosmología clásica, la ptolemaica, pero con eso solo no era suficiente: sin las aportaciones posteriores de Kepler, Galileo y Newton, habría quedado en nada, o, mejor, no se habría podido sostener.[3] Y esa insuficiencia en darse cuenta de que la génesis, el establecimiento y la consolidación de las revoluciones científicas necesitan de elementos diversos, que, por así decir, van acumulándose (por utilizar un término especialmente querido por Kuhn), asociándose entre sí a lo largo de un cierto periodo de tiempo, reside, en mi opinión, una de las debilidades de la metodología del desarrollo científico propuesta por Kuhn. Es preciso estudiar la dinámica de las revoluciones, su «estructura fina». Las revoluciones de que me ocupo en este libro, la relativista y la cuántica, merecen, efectivamente, ser consideradas «revolucionarias», pero si las asociamos, o intentamos caracterizar, únicamente en función de los trabajos de Albert Einstein en 1905 y 1915, por un lado, y, por otro, de Bohr, Heisenberg, Schrödinger y Dirac, entre 1913 y 1927, perderemos aspectos esenciales de esas revoluciones. Más aún, puede suceder, sucede de hecho, que de las rupturas revolucionarias iniciales, broten posteriormente nuevas «micro»-revoluciones. En los capítulos que siguen, nos encontraremos con algunos ejemplos; novedades revolucionarias que no podían haber sido soñadas por los revolucionarios fundadores, o que si percibieron sus posibilidades, las rechazaron como imposibles. ¿Quién podía imaginar que al desarrollar los principios cuánticos, aplicándolos a otros escenarios, surgiría la posibilidad, después confirmada, de la existencia de «antimateria», casi un contrasentido, un oxímoron? En el caso de Einstein, no olvidemos que, al igual que otros tras él, se dio cuenta de que la teoría de la relatividad general conducía a la predicción de lo que más tarde se denominaron «agujeros negros», posibilidad absurda para él que, sin embargo, ha terminado confirmándose.

Podríamos, de hecho, considerar esas «micro-revoluciones» como revoluciones propiamente dichas, independientes, por mucho que estén relacionadas con ellas, de las «revoluciones madre». Roger Penrose, eminente matemático y físico teórico relativista que nos aparecerá en el capítulo 2, aludió a esta posibilidad cuando escribió (2000: 221): «[En nuestro siglo XX] hemos tenido no una sino dos grandes revoluciones en nuestra visión del mundo. De hecho, alguien podría decir que hemos tenido tres, o acaso cuatro de esas revoluciones. Esto significa considerar que las teorías especial y general de la relatividad representan revoluciones distintas, y también tomar la teoría cuántica y la teoría cuántica de campos como representando posiblemente revoluciones separadas».

Uno de los propósitos del presente libro es estudiar la dinámica de las revoluciones relativista y cuántica, pero centrándome en lo que sucedió en la segunda mitad del siglo XX, aunque también me ocupe —en el capítulo 1 y ocasionalmente en otros— de explicar sus antecedentes en la primera mitad de la centuria. Se trata, en definitiva, de analizar el mundo después de la revolución, de las revoluciones, un mundo científico, como se verá, extremadamente variado y plural, aunque yo aquí me haya centrado en la física relativista (gravitación, astrofísica y cosmología) y cuántica. Mientras que existen cientos de obras dedicadas a estudiar o divulgar las revoluciones relativista y cuántica tal y como se produjeron durante, esencialmente, el primer cuarto del siglo XX, muchísimo menos se ha escrito sobre sus «secuelas», en especial las que tuvieron lugar durante la segunda mitad del siglo. Y fue entonces cuando realmente cambió el mundo, el de la ciencia, por supuesto, pero también el «mundo» en su sentido más general, el mundo de todos (o al menos de muchos, no olvidemos a los más desfavorecidos, aquellos que no tienen nada o casi nada) y de todos los días, configurado, labrado, con los frutos de la ciencia y la tecnología. Precisamente por esto, el último capítulo se titula «Y la física cambió el mundo».

Thomas Kuhn se dio cuenta de que las revoluciones científicas, los nuevos paradigmas que surgen de ellas, cambian el mundo, pero ensimismado como estaba en el contexto puramente científico, sus disquisiciones no incluyeron el apartado social: «Examinando», escribía (Kuhn 1962, 1971: 176), «el registro de la investigación pasada, desde la atalaya de la historiografía contemporánea, el historiador de la ciencia puede sentirse tentado a proclamar que cuando cambian los paradigmas, el mundo mismo cambia con ellos. Guiados por un nuevo paradigma, los científicos adoptan nuevos instrumentos y buscan en lugares nuevos. Lo que es todavía más importante, durante las revoluciones los científicos ven cosas nuevas y diferentes al mirar con instrumentos conocidos y en lugares en los que ya habían buscado antes. Es algo así como si la comunidad profesional fuera transportada repentinamente a otro planeta, donde los objetos familiares se ven bajo una luz diferente y, además, se les unen otros objetos desconocidos. Por supuesto, no sucede nada de eso: no hay trasplantación geográfica; fuera del laboratorio la vida cotidiana continúa como antes. Sin embargo, los cambios de paradigmas hacen que los científicos vean el mundo de la investigación, que les es propio, de manera diferente. En la medida en que su único acceso a ese mundo se lleva a cabo a través de lo que ven y hacen, podemos desear decir que, después de una revolución, los científicos responden a un mundo diferente».

Comprendo bien el enfoque —a la postre desenfoque más bien— de Kuhn: la historia de los cambios científicos es tan variada y compleja, que es difícil escaparse de ella. Las páginas que siguen constituyen buena muestra de ello, en la medida que predominan sobre todo los hechos y circunstancias puramente científicas. No obstante, como también comprobarán los lectores, me he esforzado por incluir circunstancias, hechos, procedentes del ámbito sociopolítico sin los cuales no es posible entender realmente por qué pasó lo que pasó. No he olvidado, asimismo, dar cabida a la tecnología, el trasfondo necesario en muchos de los avances puramente científicos, ni intentar dar a los experimentos el papel, central, que poseen. También en estos puntos el modelo de Kuhn muestra limitaciones. Es cierto que en la Structure of Scientific Revolutions se mencionan, por ejemplo, los errores experimentales que se cometieron al estudiar la fisión del uranio, cuán «estrechamente entrelazadas» se encontraban «las novedades fácticas y las teóricas» en el «descubrimiento del oxígeno, o la falta de precisión en los aparatos para detectar el arrastre del éter» (Kuhn 1971: 105, 93, 124). Sin embargo, en todos estos casos Kuhn daba prominencia al lado teórico de la ciencia. Y en lo que se refiere a la incidencia de la tecnología, no encontramos prácticamente nada, si entendemos que la tecnología no está, ni puede estar, al margen de la industria.

Como señalé al principio, soy, en el fondo y necesariamente (debido a la implacable lógica de la biología), un hombre de, sobre todo, la segunda mitad del siglo XX. Como me eduqué en la física, disciplina en la que me doctoré, aunque terminase —después de ejercer no pocos años como investigador en el campo de la física relativista— por abandonarla en favor de la historia de la ciencia, mi mirada a la historia que se reconstruye en este libro tiene, inevitablemente, una dimensión personal. He asistido, no en primera línea pero sí en su entorno, como miembro de «la comunidad» de físicos, a una buena parte de los desarrollos de los que trato aquí. No he sido, por consiguiente, un espectador ajeno o alejado de ellos. No puedo olvidar —todo lo contrario, constituyen recuerdos muy queridos— que asistí a conferencias o seminarios de, entre otros, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Julian Schwinger, Victor Weisskopf, Rudolf Peierls, Sheldon Glashow y Stephen Hawking (cuando aún podía hablar y, mal que bien, se le entendía), que he conversado con Fred Hoyle, Eugene Wigner, Hermann Bondi, David Bohm, John Bell, Roger Penrose, Murray Gell-Mann y Charles Townes. La historia que he compuesto no es la «historia como participante» de la que trató Arthur Schlesinger (1971), pero tampoco es la del

analista que la contempla desde la distancia, ajeno a los sentimientos, esperanzas o frustraciones de los profesionales del campo que se estudia. Y ya sabemos los vicios que semejante cercanía puede acarrear; recuérdese, si no, aquello que dijo sir Walter Raleigh (1614, 1829: II, lxiii): «Whosoever, in writing historical research, shall follow truth too near the heels, it may haply strike out his teeth» («Todo aquel que, al escribir una historia moderna, se pegue demasiado a los talones de la verdad, acaso puede darse en los dientes»). Claro que también se puede citar a Alexis de Tocqueville, quien en las notas para el segundo volumen sobre la Revolución Francesa que nunca llegó a escribir, manifestaba (Tocqueville 1959: 32): «Estamos todavía demasiado cerca de aquellos sucesos como para conocer muchos detalles (esto parece curioso, pero es cierto); a menudo los detalles aparecen solamente en revelaciones póstumas y con frecuencia son ignorados por los contemporáneos. Pero lo que estos escritores conocen mejor que la posteridad son los movimientos de opinión, las inclinaciones populares de sus tiempos, las vibraciones que todavía pueden sentir en sus mentes y corazones. Los verdaderos rasgos de los protagonistas principales y de sus relaciones, de los movimientos de las masas, a menudo son mejor descritos por los testigos que registrados por la posteridad. Estos son los detalles necesarios. Aquellos cercanos a ellos, se encuentran en mejor posición para construir la historia general, las causas generales, los grandes movimientos de los acontecimientos, las corrientes espirituales, que hombres que se hallan más alejados pueden no encontrar ya».[4]

Me he esforzado, en cualquier caso, por no ser esclavo de las visiones idiosincrásicas —y de los intereses gremiales— que han prevalecido entre los físicos del mundo en el que me eduqué y crecí. Este es, sencillamente, un libro de historia. Aunque he intentado ser transparente y accesible, me doy cuenta de que para muchos puede que resulte, al menos en determinados momentos, demasiado exigente, precisamente porque la historia no puede, ni debe, escamotear los detalles imprescindibles —que en la ciencia poseen, inevitablemente, un carácter técnico— que hacen que sea posible comprender lo que sucedió (sea esto en el campo que sea, se trate de, por ejemplo, la dinastía Ming, la Guerra de los Treinta Años, el inicio de la dinastía de los Borbones en España o de la Gran Depresión de 1929). De todas maneras, sé que en la historia que reconstruyo faltan muchos «detalles»; he tenido que elegir, buscando lo que considero fundamental, lo auténticamente imprescindible, al ser tan variado y extenso lo que sucedió en la física de la segunda mitad del siglo XX, y en sus orígenes, de los que también me ocupo aunque de forma más limitada. Espero que mis elecciones hayan sido afortunadas.

Lo que no quiero ocultar es que con este libro también he pretendido homenajear a la física, que siempre será mi gran amor intelectual, no importa que ya haya abandonado sus filas por la historia, y a la que considero, desde toda mi objetiva subjetividad, una disciplina científica particularmente importante y hermosa: ninguna reúne de forma más íntima y necesaria a, por un lado, la matemática, el «instrumento» más poderoso creado por la mente humana, y a la que le proporciona una carta de realidad de la que, ciudadana como es del universo de las relaciones lógicas, en principio carece; y, por otro lado, a las demás ciencias de la naturaleza, a las que sirve y enriquece; y no olvidemos su profunda dimensión filosófica. Homenajear, honrar su pasado y presente, no significa, ocioso debería ser recordarlo, mirar acríticamente. Y ya he dicho que me he esforzado por evitar el mayor pecado que puede cometer un historiador: la hagiografía.

Todo libro tiene, al igual que prácticamente todo en esta vida, su historia, por muy minúscula y circunstancial que sea. La de este libro se entremezcla, por las razones que ya he explicado, con la de su autor, pero también debe algo a un artículo que escribí para un libro del BBVA, Fronteras del conocimiento (Sánchez Ron 2008) y cuyo título coincidía con el del presente libro: «El mundo después de la revolución: la física en la segunda mitad del siglo XX». De aquel trabajo surgió la idea de este libro.

Más importante es el agradecimiento que debo a aquellos cuyas enseñanzas me hicieron amar la física. No son muchos —nunca he sido un buen oyente, ni un buen discípulo, mi mundo es sobre todo el de la lectura y estudio personal—, pero sí excelentes: Alberto Galindo, del que fui alumno en la Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense, y con el que conocí por primera vez una física verdaderamente moderna y el rigor que esta exige, Francisco Ynduráin, físico superior, añorado amigo y colega, Luis Bel, que me enseñó lo que realmente es la investigación y la física relativista, Felix Pirani, uno de mis supervisores de tesis en Londres, del que aprendí la elegancia matemática en la física relativista y en la física en general, y Peter Havas, relativista plural y profundo, sensible y buen conocedor de la historia de su especialidad, con quien trabajé en Filadelfia. Tampoco puedo ni quiero olvidar a Paul Forman, entrañable amigo e inigualable historiador de la ciencia, que no solo me enseñó a ser mejor —o a intentar serlo— historiador de la ciencia, sino a entender al mismo tiempo mejor a la ciencia y a los científicos, y a pensar con profundidad;

ni a Gonzalo Pontón, editor y querido amigo, que me convenció para escribir esta obra y tuvo que penar con paciencia ejemplar con mis continuos retrasos.

Con su habitual dedicación y generosidad, mi esposa, Ana, revisó todo el manuscrito, logrando que fuese mejor.

Madrid, julio de 2014

1

REVOLUCIONES EN LA FÍSICA

(PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX)

La primera mitad del siglo XX fue un periodo particularmente rico y novedoso para la física. Se produjeron entonces dos grandes revoluciones: la relativista y la cuántica, asociadas a la formulación de las teorías especial y general de la relatividad, y a la mecánica cuántica. Tras ofrecer, en la primera parte del presente capítulo, un resumen de ambas revoluciones, me adentraré en lo que podríamos denominar «pequeñas revoluciones dentro de las revoluciones»; esto es, productos tempranos y en buena medida inevitables de esas revoluciones, como la cosmología relativista, el descubrimiento de la antimateria y la electrodinámica cuántica; y también en la extensión de la revolución cuántica a otros dominios, como el de la química, que también se produjeron durante la primera mitad del siglo XX.

EL GERMEN DE UNA REVOLUCIÓN: DE MAXWELL A LORENTZ

La relatividad especial, la primera de las dos formulaciones que comparten la denominación de relatividad, surgió como respuesta a la «falta de entendimiento» que crecientemente se percibía entre la mecánica newtoniana y la electrodinámica de James Clerk Maxwell (1831-1879). Esta electrodinámica fue el resultado de una línea de investigación que se abrió en 1820, y constituyó uno de los grandes momentos de la ciencia del siglo XIX, hasta el punto de que algunas de sus consecuencias, o aplicaciones —como, por ejemplo, la existencia de ondas electromagnéticas—, cambiaron el mundo.

El camino que condujo a la electrodinámica maxwelliana comenzó en 1820, cuando un catedrático de Física de la Universidad de Copenhague, Hans Christian Oersted, realizó un, en principio, sencillo experimento que demostraba que la electricidad —fuese esta lo que fuese— afectaba al magnetismo, una idea que era rechazada por «científicos más distinguidos», como André-Marie Ampère, quien sostenía que «los fenómenos eléctricos y magnéticos son debidos a dos fluidos diferentes que actúan de manera independiente entre ellos». Lo que hizo Oersted fue colocar un hilo metálico (esto es, un conductor) horizontalmente, en la dirección del meridiano magnético, justo por encima de una aguja magnética. Cuando no circulaba corriente por el hilo, este y la aguja se mantenían paralelos, pero cuando se conectaba el hilo a una batería de Volta —ideada por este físico italiano en 1800 y capaz de suministrar corriente continua— la aguja se desviaba, tanto más cuanto mayor fuese la intensidad de la corriente. Y cuando se cambiaba el sentido de la corriente (alterando el orden de la conexión a los polos de la batería), la aguja se desviaba en sentido contrario. Magnetismo y electricidad, hasta entonces distintos e independientes se revelaron sensibles a la proximidad.

En 1821, poco después de saber de los trabajos de Oersted, uno de los grandes nombres no solo de la historia del electromagnetismo, sino de toda la historia de la ciencia (de la física y la química en particular), Michael Faraday (1791-1867) dio un nuevo paso en el estudio de las relaciones entre electricidad y magnetismo demostrando que un hilo por el que pasa una corriente eléctrica puede girar de manera continua alrededor de un imán (y viceversa), con lo que se vio que era posible obtener efectos mecánicos (movimiento) de una corriente

que interacciona con un imán. Sin pretenderlo, había sentado el principio del motor eléctrico. Pero en su trabajo de 1821 aún no había demostrado el efecto recíproco al obtenido en 1820 por Oersted; esto es, que la variación del magnetismo puede afectar a la electricidad. Esto es algo que conseguiría una década después, en 1831, prácticamente al mismo tiempo que lo hacía el físico estadounidense Joseph Henry, aunque este se demoró en hacer públicos sus resultados.

Básicamente, lo que hizo Faraday fue demostrar que cuando sobre un anillo de hierro, con dos devanados separados, se hacía pasar corriente por uno de los devanados, en el otro devanado se producía una corriente transitoria eléctrica «inducida». En otro golpe de genio, efectuó otro experimento: tomó un disco de cobre con un muelle de contacto con un extremo presionando contra el eje del disco y el otro extremo contra su perímetro, estando los dos conectados a un galvanómetro (un aparato para detectar corrientes eléctricas), e hizo que el disco girase a velocidad constante, alrededor de su eje, en un campo magnético cuyas líneas de fuerza eran perpendiculares al plano del disco, y comprobó que, mientras el disco giraba, se creaba una corriente eléctrica constante que circulaba a través del galvanómetro. De esta manera nació la primera dinamo rudimentaria, o máquina para generar corrientes eléctricas, solo con el movimiento de un conductor de cobre en un campo magnético. Si la máquina de vapor había proporcionado la energía necesaria para extraer el agua de las minas y aumentar la producción de carbón que alimentó las distintas máquinas que transformaron el proceso de producción, afectando de esta manera profundamente a la sociedad (la Revolución Industrial), la producción de corriente eléctrica en grandes cantidades, que permitió la invención por Faraday de la dinamo, terminó produciendo efectos similares.

Aunque poseían un profundo trasfondo conceptual, los trabajos de Faraday eran de índole experimental. Carente de formación matemática, él era incapaz de producir un sistema teórico que englobase los fenómenos eléctricos y magnéticos. Esa fue la tarea que asumió, y logró, Maxwell. Expresado de manera sintética, la teoría que estableció Maxwell en la década de 1860 estaba constituida por un conjunto de doce ecuaciones en derivadas parciales (cuatro grupos de tres ecuaciones vectoriales) donde las incógnitas a determinar son una serie de funciones que definen una «estructura continua» que transmite la fuerza —la interacción— electromagnética. Esa «estructura continua» es lo que denominamos «campo electromagnético». Al contrario de lo que sucedía con la dinámica que había propuesto Newton en sus Principia, en donde la interacción

se transmite a distancia, sin ningún tipo de soporte, la explicación de Maxwell se basaba en un medio continuo, el campo electromagnético. Este modelo, el de las teorías de campos, que no violenta nuestras capacidades cognitivas, fue el que se impondría en la física del futuro.

En uno de los artículos («Sobre las líneas físicas de fuerza», Philosophical Magazine; Maxwell 1861-1862) en los que Maxwell presentó su teoría, dio a conocer un resultado de extraordinaria importancia: la unificación de la óptica con el electromagnetismo, puesto que al calcular la velocidad de las ondas electromagnéticas transversales a partir del cociente entre el campo eléctrico y el magnético, encontró el valor conocido para la velocidad de la luz. Siglo y medio después de que fuesen escritas esas palabras, todavía se puede apreciar la excitación que sentía Maxwell (1861-1862; Niven, ed., 1965: vol. I, 500) cuando escribió: «Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos». En esa escueta frase subyacían desarrollos que iban a cambiar el mundo: gracias a las ondas, a las señales electromagnéticas, a la radio — o como al principio se denominó, a la «telegrafía sin hilos»— el mundo se interconectaría.

La teoría elaborada por Maxwell describía la dinámica del campo electromagnético, esto es cómo variaba el vehículo de la interacción electromagnética, pero no cómo interaccionaban las «cargas» eléctricas con ese campo. Uno de los problemas era que todavía se ignoraba cuál era la naturaleza de esas «cargas»; el «electrón», la unidad discreta de carga eléctrica, no sería descubierto hasta 1897 por Joseph John Thomson, aunque es cierto que mucho antes existían indicaciones a favor de «cargas eléctricas discretas» a través de experimentos en electrolisis. Fue el físico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) quien asumió la tarea de describir teóricamente la interacción entre cargas eléctricas puntuales y el campo eléctrico, en lo que denominó «teoría del electrón».

Un punto muy importante es que para Lorentz existía algo así como un valor absoluto para la velocidad de la luz: el que esta tenía en un sistema en reposo con respecto al éter-campo electromagnético. Para él, el campo desempeñaba, más o menos, el mismo papel que el espacio absoluto newtoniano, y los movimientos de todos los cuerpos (incluyendo las fuentes de luz) se efectuaban sobre él. Además, Lorentz recurría a las transformaciones de Galileo cuando quería describir, por ejemplo, la dinámica del campo electromagnético asociado

a una carga que se movía con respecto a ese éter electromagnético absoluto. Y cuando aplicaba esas transformaciones a las ecuaciones del campo estas variaban de forma, lo que significaba que la velocidad de la luz (que en lo sucesivo denotaremos con la letra c) en el nuevo sistema de referencia inercial asociado a la carga en movimiento era diferente a la de la luz en el vacío, definido por el éter electromagnético de referencia.

Sin embargo, resultados experimentales plantearon problemas. La principal manifestación de esos problemas procedió de un artículo que apareció en el número de diciembre de 1887 de la revista inglesa Philosophical Magazine. Sus autores eran dos físicos estadounidenses, Albert Michelson y Edward W. Morley (1887). Realizaron su experimento empleando un interferómetro; esto es, un aparato que utiliza las propiedades ondulatorias de la luz de la siguiente manera: cuando un haz de luz, que procede de una fuente, se divide en dos haces que se vuelven a unir posteriormente, el haz resultante mostrará zonas de interferencia visibles si la trayectoria de uno de los haces sufre algún cambio antes de volver a reunirse con el otro haz. Como las ondas de luz (su longitud de onda) que generan las interferencias son muy pequeñas, una variación minúscula en la longitud de la trayectoria o en el índice de refracción del medio que recorre uno de los haces producirá un efecto que se puede medir. La cuestión era que si la Tierra se movía sobre el campo electromagnético «primordial» que Lorentz suponía en reposo, el tiempo que tardaría un rayo de luz emitido en la superficie terrestre en recorrer una cierta distancia debería ser diferente según que este se desplazase en el sentido de movimiento de la Tierra con respecto al éter, o en sentido opuesto. Michelson y Morley no encontraron ninguna diferencia; parecía que el éter no afectaba al movimiento de la luz.

El experimento generó una crisis en la física. Además de Lorentz, a quien volveré enseguida, un irlandés, George Francis FitzGerald, se distinguió con una propuesta que hizo en 1889, cuando sugirió, de forma ad hoc, que el efecto se debía a que el movimiento con respecto al éter absoluto maxwelliano producía un acortamiento del brazo del interferómetro que seguía la dirección del movimiento (que no se observaba en la dirección perpendicular al movimiento); esto es, que se producía una «contracción de longitudes».

Lorentz también utilizó esta hipótesis, pero dentro de su propio programa de investigación. Manteniéndose fiel tanto a la dinámica newtoniana como a la electrodinámica maxwelliana, y progresando a lo largo de diferentes artículos (el último de 1904: Lorentz 1904), fue capaz de explicar el experimento de

Michelson y Morley introduciendo un cambio en las ecuaciones que, en la mecánica de Newton tradicional, relacionan posiciones y tiempo en dos sistemas de referencia inerciales (aquellos que se mueven entre sí con velocidad constante, v). El cambio suponía una contracción de la longitud de un cuerpo en movimiento y una dilatación del tiempo. Como homenaje a su contribución todavía hoy se denomina a tales ecuaciones, que mantienen su validez en la teoría de la relatividad especial, «transformaciones de Lorentz».

Desde un punto de vista formal, matemático, con estas transformaciones las ecuaciones del campo electromagnético no varían de forma cuando se las describe en sistemas de referencia inerciales diferentes; son, como se diría con el paso del tiempo, «invariantes Lorentz».

Es interesante incidir sobre el carácter de la transformación en la variable temporal. A Lorentz no le planteaba ningún problema conceptual aceptar que las longitudes se modificaban: ¿qué era la materia sino agrupaciones de moléculas? y estas se mantenían unidas, pensaba, mediante fuerzas electromagnéticas. De manera que el movimiento del interferómetro, con respecto al éter electromagnético en reposo absoluto, debería producir cambios en las fuerzas intermoleculares que afectarían a sus longitudes. Sin embargo, con el tiempo era diferente; no se le podía aplicar un esquema conceptual parecido. De hecho, Lorentz pensó que el tiempo, local, t’ al que tenía que recurrir no era más que una «cantidad matemática auxiliar», un «artificio puramente formal» desprovisto de significado físico. Para él, el tiempo continuaba siendo tan universal como había sostenido Newton, y la velocidad de la luz solo tenía el valor c en el sistema en el que el éter electromagnético (en cuya realidad física él creía firmemente) estaba en reposo.

LA REVOLUCIÓN: LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Para eliminar las discrepancias entre la mecánica newtoniana y la electrodinámica maxwelliana, Albert Einstein (1879-1955), entonces un joven empleado de la Oficina de Patentes de Berna, siguió un camino muy diferente al de Lorentz: construyó una teoría basada en dos postulados básicos.[5] El primero, «Principio de relatividad» —presente ya en la mecánica de Newton— mantiene que las leyes de la física no se ven afectadas por el hecho de que se las describa en sistemas de referencia inerciales diferentes, mientras que el segundo postulado afirma que la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales; esto es, que es independiente del estado de movimiento del cuerpo que la emite, una suposición profundamente contraintuitiva y que violenta a la física newtoniana. En consecuencia, la velocidad de la luz es una magnitud máxima pero finita; ninguna suma de velocidades puede superarla.

Combinando ambos postulados, Einstein no solo dedujo las mismas ecuaciones de transformación que había introducido Lorentz sino que también sostenía, como escribía en el artículo «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento» (Einstein 1905 b: 892) en el que presentó su teoría, que «la introducción de un “éter luminífero” demostrará ser superflua en tanto que la visión desarrollada aquí no requiere de un “espacio absoluto estacionario”».

La lectura del artículo de Einstein impresiona aún hoy, más de un siglo después. Y lo hace por su claridad y limpieza argumentativa, además de, por supuesto, su originalidad. Comenzaba con unas consideraciones generales, de naturaleza, podríamos decir, «estética» o, mejor, utilizando un lenguaje matemático, consideraciones de simetría, de invariancia, que, por cierto, terminaron desempeñando un papel importante en la física teórica —especialmente en la de altas energías— de la segunda mitad del siglo XX (Einstein 1905 b: 891):

Es sabido que la electrodinámica de Maxwell —tal y como se entiende actualmente— conduce a asimetrías que no parecen inherentes a los fenómenos, cuando se aplica a cuerpos en movimiento. Tómese, por ejemplo, la acción electromagnética recíproca entre un imán y un conductor. El fenómeno que aquí se observa depende únicamente del movimiento relativo entre el conductor y el

imán, mientras que la visión habitual establece una aguda distinción entre los dos casos en que uno u otro de estos cuerpos está en movimiento. Ya que si el imán está en movimiento y el conductor en reposo, entonces aparece en los alrededores del imán un campo eléctrico con una cierta energía definida, que produce una corriente en aquellos lugares donde se encuentran partes del conductor. Pero si el imán está en reposo y el conductor en movimiento, no surge ningún campo eléctrico en los alrededores del imán. Sin embargo, en el conductor encontramos una fuerza electromotriz para la que no existe la energía correspondiente, pero que da lugar —suponiendo que el movimiento relativo es el mismo en los dos casos discutidos— a corrientes eléctricas del mismo sentido e intensidad que las producidas por las fuerzas eléctricas en el caso anterior.

No podía ser correcto, estaba afirmando Einstein, que se expliquen de manera diferente, en base teórica, fenómenos en los que intervienen dos elementos que se mueven entre sí, dependiendo de que consideremos que sea uno el que se mueve con respecto al otro. Y tras esta introducción metodológica, añadía: «Ejemplos de esta especie, junto a los intentos fracasados de descubrir un movimiento de la Tierra con respecto al “medio de la luz”, sugieren que los fenómenos electromagnéticos, lo mismo que los mecánicos, no poseen propiedades que corresponden a la idea de reposo absoluto».

Es importante hacer hincapié en que la relatividad especial iba más allá del electromagnetismo. Aunque incorporaba el grupo de transformación de Lorentz, que deja invariante las ecuaciones de Maxwell bajo cambios de un sistema inercial a otro, no se limitaba a la interacción electromagnética; la teoría de Einstein era, es, una especie de requisito cinemático o geométrico que deben verificar, en principio, todas las interacciones físicas.

Una de las consecuencias de la relatividad especial, de las transformaciones de Lorentz entendidas a la manera de Einstein, es que longitudes y tiempos resultan ser relativos al estado del movimiento (inercial) del observador. El tiempo y el espacio dejaban de ser medidas absolutas, como sostuvo en su física Newton, y pasaban a ser entidades relativas al estado de movimiento del observador. Si hay novedades revolucionarias, estas figuran entre ellas, más aún cuando fueron comprobadas con profusión (por ejemplo, en rayos cósmicos y aceleradores de partículas).

«Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento» llegó a la redacción de los Annalen der Physik el 30 de junio de 1905, siendo publicado en el número que apareció el 26 de septiembre de ese año; un día después, el 27, llegaba a la misma redacción otro artículo de Einstein (que se publicaría el 21 de noviembre) titulado: «¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?» (Einstein 1905 c). En él, el empleado de la Oficina de Patentes presentaba un mero corolario de la teoría de la relatividad especial, que se condensa en una sencilla expresión matemática,

$$E=m\cdot c2$$

(donde E representa la energía, m la masa y c, como ya sabemos, la velocidad de la luz), relación que permitió comprender inmediatamente la razón de la aparente inagotable energía producida en los fenómenos radiactivos. Estableció, asimismo, que la masa de un cuerpo crece en la medida en que la velocidad del movimiento se acerca a la de la luz.

UN MUNDO DE CUATRO DIMENSIONES

Una de las características más llamativas de la relatividad especial es su formulación en cuatro dimensiones. Y aunque la temporal tenga carácter imaginario (ict), la necesidad de abandonar un espacio tridimensional para pasar a un espacio-tiempo cuadridimensional ha dejado una marca importante en la física teórica, además de constituir un factor destacado en la atracción que la relatividad ha ejercido en muchos.

Sin embargo, la interpretación cuadridimensional espacio-temporal de la relatividad restringida no estaba contenida en el artículo de Einstein de 1905, sino que se debe al matemático Hermann Minkowski (1864-1909), uno de los maestros de Einstein en el Politécnico de Zúrich, en donde cursó sus estudios de física. El gran sentido geométrico de Minkowski se plasmó, en lo que a la teoría einsteiniana se refiere, el 21 de septiembre de 1908, cuando pronunció una conferencia titulada «Espacio y tiempo» (Minkowski 1909) ante el 80 Congreso de Científicos y Médicos Alemanes, reunidos en Colonia. En aquella ocasión, Minkowski pronunció estas ya célebres frases: «Las visiones del espacio y el tiempo que deseo presentarles han surgido del terreno de la física experimental y de ahí toman su fuerza. Son radicales. A partir de ahora el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y solamente una especie de unión de los dos conservará su independencia».

Además, la formulación espacio-temporal de la relatividad especial resultó ser un elemento imprescindible para poder construir la relatividad general.

LA REVOLUCIÓN SE EXTIENDE: LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD

Al contrario que la teoría de la relatividad especial, cuya estructura básica fue desarrollada por Einstein en forma definitiva en un solo trabajo, la relatividad general —la teoría relativista de la gravitación que sustituyó a la teoría de la gravitación universal de Newton de 1687— exigió un periodo de tiempo mucho más largo para su elaboración, aproximadamente de 1911 a 1915, aunque ya en 1907 Einstein formulase la esencia del problema. Ese año, Johannes Stark —quien años más tarde, siendo un ferviente nazi, se opondría agriamente a Einstein y a sus teorías— pedía a Einstein que escribiese un artículo para la revista Jahrbuch der Radioaktivitat und Elektronik, de la que era editor, en el que recopilase todo lo referente al «principio de relatividad». En una de las secciones de este artículo (la número 17, «Sistema de referencia acelerado y campo gravitacional», perteneciente al capítulo V, titulado «Principio de relatividad y gravitación»), Einstein (1907: 454) escribía: «Hasta ahora hemos aplicado el principio de relatividad —es decir, la suposición de que las leyes de la naturaleza son independientes del estado de movimiento del sistema de referencia— únicamente a sistemas de referencia no acelerados. ¿Es concebible que el principio de relatividad sea también válido para sistemas acelerados entre sí?».

El problema era evidente y lo que hizo Einstein fue considerar dos sistemas de referencia en movimiento, S y S’, asumiendo que el primero estaba acelerado en la dirección del eje x, y que g era el valor (constante) de esta aceleración. Señalaba (Einstein 1907: 454), «supongamos que S’ está en reposo, pero situado en un campo gravitacional homogéneo, que imparte una aceleración –g en la dirección del eje x a todos los objetos. Por lo que sabemos, las leyes físicas con respecto a S no difieren de aquellas con respecto a S’; esto proviene del hecho de que todos los cuerpos son acelerados de la misma forma en un campo gravitacional [experimento de Galileo]. Por consiguiente, en base a nuestra experiencia actual, no tenemos ninguna razón para suponer que los sistemas S y S’ puedan ser distinguidos entre sí de alguna manera, y por tanto supondremos que existe una equivalencia física completa entre el campo gravitacional y la correspondiente aceleración del sistema de referencia».

Vemos cómo, en este párrafo, Einstein relacionaba de una manera

auténticamente genial la descripción teórica de la interacción gravitacional con su deseo de generalizar el principio de relatividad especial, de manera que englobase una clase más amplia de sistemas de referencia que los inerciales. El vínculo de unión, que subyace en su explicación, es una no explicada coincidencia en la mecánica newtoniana: la proporcionalidad (igualdad si se eligen sistemas de unidades adecuados) entre la masa inercial y la masa gravitacional.

Esta equivalencia entre campos gravitacionales y sistemas de referencia acelerados se denomina «principio de equivalencia» y fue la única pieza, de todas las que formaban su «rompecabezas gravitacional», que en ningún momento Einstein abandonó durante los años que empleó en buscar una teoría de la relatividad general.

El camino que abrió en 1907 le condujo, tras una serie de idas y venidas, a formular la definitiva teoría relativista de la gravitación: la teoría de la relatividad general (Einstein 1915). La característica más llamativa de esta teoría es que el espacio y el tiempo, el espacio-tiempo cuadridimensional, el marco de referencia para describir cualquier fenómeno, no está prefijado sino que depende del contenido de energía y de materia que hay en él. Y como los intercambios energético-materiales aparecen en todos los fenómenos, la consecuencia es que el espacio-tiempo de la relatividad general es curvo, no plano como en todas las teorías anteriores —la relatividad especial incluida— de la física. Una imagen intuitiva de este tipo de espacio sería —si únicamente tuviese, que no tiene, tres dimensiones— la de una malla elástica que se deforma cuando una bola (el equivalente de un planeta) rueda sobre ella.

Hay que señalar que no habría sido posible desarrollar la teoría de la relatividad general de no haber experimentado la geometría una profunda e innovadora renovación durante el siglo XIX. En efecto, los repetidos esfuerzos encaminados a demostrar que el quinto postulado de los Elementos de Euclides, el de las paralelas, era una pieza superflua en la estructura de la obra, que podía deducirse de otros axiomas, llevaron, durante el primer tercio del siglo XIX, a la sorprendente conclusión de que no solamente era un postulado realmente independiente, sino que de su negación no se deducían contradicciones; esto es, que se puede sustituir por otros postulados alternativos que conducen a geometrías diferentes de la euclídea, pero lógicamente correctas. Me estoy refiriendo a las geometrías asociadas primordialmente a los nombres de Carl Friedrich Gauss, Nicolai Ivanovich Lobachevskii y Janos Bolyai. Inicialmente,

el descubrimiento de las geometrías no euclídeas no atrajo excesivo interés, pero una combinación de sucesos relanzó su estudio. En primer lugar, tenemos la lección de habilitación que Bernhard Riemann pronunció en 1854: Über die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen (Sobre las hipótesis que sirven de fundamento a la geometría); de ahí que sea común hablar de «espacios riemannianos». En segundo lugar, está la publicación, entre 1860 y 1865, de la correspondencia de Gauss con Heinrich C. Schumacher, con su referencia favorable al trabajo de Lobachevskii. Finalmente, la demostración de Eugenio Beltrami, en 1868, de que la geometría de Lobachevskii podía interpretarse como la geometría de una superficie de curvatura constante y negativa.

Inmediatamente después de ser establecida la teoría de la relatividad general, en 1916, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild encontró una solución exacta de las ecuaciones del campo gravitacional einsteiniano en el vacío, producido por un cuerpo con simetría esférica, una situación que se podía asimilar al campo producido por el Sol, en el que se movían los planetas. De esta solución (Schwarzschild 1916) se deducían tres efectos observables: el desplazamiento del movimiento del perihelio (punto de una órbita más cercano al Sol) de un planeta, con respecto a la predicción newtoniana, la curvatura de los rayos de la luz en presencia de un campo gravitacional, y el desplazamiento hacia el rojo de las líneas del espectro electromagnético. Que el movimiento del perihelio de un planeta planteaba problemas a la teoría de la gravitación universal de Newton es algo que se sabía, desde hacía mucho tiempo, en el caso de Mercurio, y resultó que la desviación medida era precisamente la que se deducía de la solución de Schwarzschild. En cuanto a la segunda predicción, la de la curvatura de los rayos de luz (una novedad con respecto a la teoría de Newton, puesto que en esta la gravedad afectaba a los cuerpos en función de la masa de estos y como la luz carecía de masa no se veía afectada por la gravedad, por lo que debía propagarse en línea recta), se comprobó en 1919, durante una expedición británica —dirigida por Frank Dyson, el astrónomo real inglés, y Arthur Eddington (1882-1944), catedrático de Astronomía en Cambridge— para observar, desde la isla Príncipe, en África, y desde Sobral, en el norte de Brasil, un eclipse de Sol que tuvo lugar el 29 de mayo. (Es durante un eclipse cuando se pueden fotografiar los rayos procedentes de estrellas que pasan cerca de la superficie solar, que es donde la gravedad es más intensa y, por consiguiente, el efecto de desviación predicho por la relatividad general.) Los resultados de aquella expedición, que confirmaban las predicciones de la teoría de la gravitación einsteiniana, fueron anunciados en Londres el 6 de noviembre de 1919, en una reunión conjunta de la Royal Society y la Royal Astronomical Society. El día siguiente la noticia

aparecía publicada en The Times bajo el titular

«REVOLUCIÓN EN CIENCIA

Nueva teoría del Universo

Ideas newtonianas desbancadas»

Este hecho desencadenó una ola creciente de noticias, que hizo de Einstein el personaje de fama mundial que aún es hoy, más de medio siglo después de su muerte.

COSMOLOGÍA

En 1916, casi inmediatamente después de haber producido la versión definitiva de la relatividad general, Einstein se planteó la posibilidad de aplicarla al conjunto del Universo, puesto que la interacción dominante en él es la gravitacional (la masa es aditiva —no hay masas negativas— mientras que no ocurre así con la carga eléctrica). El propósito era buscar soluciones cosmológicas a las ecuaciones del campo gravitacional, aplicables a todo el Universo. Imbuidos como estamos en la actualidad de la idea de que el Universo se expande, acaso podría pensarse que una de las posibilidades que Einstein tuvo en mente fue la de un universo dinámico. Sin embargo, no fue así: la idea de un universo de ese tipo era extraña no solo a Einstein sino también a los científicos de entonces (al menos a los conocidos). Einstein pensó en un universo estático, cuyo contenido fuese una distribución uniforme de partículas. Naturalmente, en el Universo vemos movimientos, cambios, pero, como primera aproximación, bien podría suponérsele uniforme, al fin y al cabo existe una media uniforme subyacente. Pero el problema con el que se encontró es que ese Universo no sería estable, debido a la atracción gravitacional entre los cuerpos que lo constituían. Una solución posible era introducir un campo repulsivo de fuerzas, representado por lo que denominó «constante cosmológica». Si antes las ecuaciones del campo en la relatividad general eran:

$$R\alpha\beta - \tfrac{1}{2}\cdot g\alpha\beta\cdot R = cte\cdot T\alpha\beta$$

donde Rαβ, gαβ y Tαβ son unos objetos matemáticos denominados «tensores» (gαβ el más básico, el tensor métrico, que básicamente da la distancia en un espacio, siendo Rαβ una combinación de los gαβ y sus derivadas, y Tαβ el tensor de energía-momento, que representa el contenido energético-material del sistema considerado), mientras que los índices α y β varían de 1 a 4, para la cosmología relativista que Einstein introdujo en 1917, esas ecuaciones pasaban a ser

$$R\alpha\beta - \tfrac{1}{2}\cdot g\alpha\beta\cdot R + \Lambda\cdot g\alpha\beta = cte\cdot T\alpha\beta$$

con Λ representando la constante cosmológica.

Con el nuevo término añadido a las ecuaciones de campo, es decir, con esta «relatividad general extendida», convertida así en cosmología relativista, Einstein (1917) pudo hallar una solución exacta que representaba el Universo estático de densidad uniforme que buscaba. Independientemente del éxito o fracaso futuro de este modelo, lo cierto es que Einstein creó la cosmología, entendida como disciplina auténticamente científica, frente a las apenas analíticas cosmogonías anteriores existentes.

Einstein se guío por consideraciones físicas en su búsqueda de la solución exacta de las ecuaciones de la cosmología relativista. Otros matemáticos, o físicos, con especiales sensibilidades y habilidades matemáticas, no siguieron semejante senda, hallando muy pronto nuevas soluciones exactas que, implícitamente, representaban otros modelos de Universo. La tarea no era fácil, ya que las ecuaciones de la cosmología relativista forman un sistema de diez ecuaciones no lineales en derivadas parciales, pero lo consiguieron. Los primeros en obtener este tipo de soluciones fueron el astrónomo holandés de Leiden, Willem de Sitter (1917), y el físico y meteorólogo ruso, con fuerte tendencia matemática, Alexander Friedmann (1922).[6] Sus soluciones, eso sí, representaban modelos de universos diferentes. La solución de De Sitter implicaba un universo en expansión, pero vacío; utilizando las propias palabras de su artículo (el tercero de una serie publicada en Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, que sirvió para dar a conocer la teoría de la relatividad general en Gran Bretaña, entonces en guerra con Alemania): «La frecuencia de las vibraciones de la luz disminuye al aumentar la distancia al origen de coordenadas. Por consiguiente, las líneas de estrellas o nebulosas muy distantes deben verse desplazadas hacia el rojo de manera sistemática, dando la impresión de una velocidad radial espuria». Por el contrario, la solución de Friedmann correspondía a un universo de densidad constante en expansión –suponiendo que hubiese pensado en semejantes términos— porque derivó su solución como un mero ejercicio matemático, sin interpretarlo como el modelo de un posible universo real.[7] Leído hoy, puede parecer que Friedmann tenía conciencia plena de las consecuencias físicas de su trabajo; véase si no, lo que escribía: «El propósito de esta nota es, en primer lugar, demostrar que los mundos [las soluciones

cosmológicas de Einstein y De Sitter] son casos especiales de suposiciones más generales y, en segundo lugar, demostrar la posibilidad de un mundo [un universo] en el que la curvatura del espacio es independiente de las tres coordenadas espaciales pero dependiente del tiempo». Y, sin embargo, no hay nada en el artículo de Friedmann que lo conecte, o intente conectar, con observaciones astronómicas, en particular con el desplazamiento hacia el rojo de los espectros que, por entonces, ya había comenzado a detectarse.[8]

La solución y el modelo cosmológico obtenido por Friedmann es conocido con frecuencia, especialmente en el mundo anglosajón, como «solución de Robertson-Walker», en honor a los trabajos del físico-matemático estadounidense Howard P. Robertson y el matemático inglés Arthur G. Walker.[9] Además de por razones como el que la aportación de Friedmann pasó bastante desapercibida por su carácter matemático, desprovisto de consideraciones físicas, está el hecho de que los trabajos (independientes) de Robertson y Walker aparecieron a finales de la década de 1920 y comienzos de la de 1930, cuando la posibilidad de que el Universo se encontrase en expansión ya era considerada seriamente, al existir desde 1929, como veremos, sólidas evidencias (Hubble) en este sentido. Además, la solución que obtuvieron Robertson (1929, 1933) y Walker (1935) era la más general compatible con la solución de Friedmann y las suposiciones de homogeneidad e isotropía.[10]

Al que no se le pueden hacer las mismas críticas de énfasis matemático que a Friedmann es al astrónomo y sacerdote católico belga Georges Lemaître (1894-1966), quien se basó en consideraciones físicas para defender la idea de una posible, real, expansión del Universo. Lo hizo en un artículo titulado «Un Universo homogéneo de masa constante y de radio creciente, que explica la velocidad radial de nebulosas extra-galácticas», que publicó en 1927 en los Annales de la Société Scientifique de Bruxelles. Tomando como base la teoría de la relatividad general y observaciones publicadas por Hubble en 1926 (durante una visita que realizó a Estados Unidos en 1924-1925, Lemaître había asistido a una reunión de la American Astronomical Society en la que Hubble presentó los resultados de sus observaciones de cefeidas en Andrómeda), Lemaître obtenía una solución de la construcción einsteiniana en la que, como señalaba en sus conclusiones, «el radio del Universo crece sin cesar desde un valor asintótico Ro, para t=-∞», y que, además, le permitía obtener una primera estimación, basada en la observación, de la constante de Hubble. En otras palabras: Lemaître no solo defendía que el Universo se expandía, sino que proponía que hubo un momento singular en el pasado en el que comenzó la historia del Universo.

A pesar de su carácter pionero, el trabajo de Lemaître pasó casi desapercibido, incluso inicialmente para Arthur Eddington, con quien Lemaître había ampliado estudios y al que había enviado su trabajo. Finalmente, y una vez que Lemaître recordase a Eddington, en 1930, el contenido de su trabajo, este difundió los resultados del abad y científico belga. La vía principal de difusión fue una nota que publicó en Nature el 7 de junio de 1930. De esta manera, los resultados de Lemaître fueron descubiertos realmente por la comunidad internacional. Ahora bien, esto no significó que fuesen tomados en serio. En este caso los argumentos teóricos no fueron lo suficiente poderosos, o convincentes para que fuesen aceptados, pese a que, por entonces, Edwin Hubble había publicado ya algunos de sus resultados. En realidad, no fue hasta 1931, cuando Hubble publicó sus resultados finales, que la expansión del Universo fue tomada realmente en serio. Incidentalmente, aquel mismo año, Lemaître (1931) propuso un nuevo modelo que intentaba incorporar la física cuántica, entonces en desarrollo. En él, el comienzo del Universo no estaba ligado a una singularidad inicial sino a un «átomo primitivo», cuya masa coincidía con la masa total del Universo; la explosión y subsiguiente expansión estaría asociada a procesos cuánticos que afectarían a ese átomo.[11]

En resumen, si se quiere ser justo desde el punto de vista histórico, la solución cosmológica que representa un universo en expansión debería ser denominada «de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker».

LA IMPORTANCIA DE LA TECNOLOGÍA: NUEVOS TELESCOPIOS PARA OBSERVAR EL UNIVERSO

Los modelos cosmológicos anteriormente descritos surgían de las soluciones de las ecuaciones cosmológicas; esto es, se trataba de posibilidades teóricas que, con anterioridad a finales de la década de 1920, solo Lemaître consideró desde el punto de vista físico, esto es, como posibles realidades físicas. La cuestión de cómo es realmente el Universo —¿estático?, ¿en expansión?— quedaba aún por dilucidar, y el único juez aceptable era la observación.

La gloria imperecedera de haber encontrado evidencia experimental a favor de que el Universo se expande pertenece, sobre todo, al astrofísico estadounidense Edwin Hubble, quien se benefició del magnífico telescopio reflector, con un espejo de 2,5 metros de diámetro que existía en el observatorio de Monte Wilson (California) en el que trabajaba, aunque, como veremos, algunos de sus resultados fueron obtenidos antes por Vesto Slipher, que trabajaba en el Observatorio Lowell (Arizona).

Pero, antes de pasar a relatar lo que estos astrónomos hicieron es importante detenerse un momento y comentar la relevancia de los instrumentos, de la tecnología, en el avance de la ciencia. En el fondo, de lo que se trata es de comprender bien el proceso mediante el cual progresa la ciencia, un proceso «dialéctico» entre observaciones y experimentos, por un lado, y teorías y modelos, por otro. Las teorías son ciertamente esenciales en la ciencia, proporcionan los esquemas organizativos, la sistematización de la que surgen las leyes que rigen los fenómenos físicos, pero no es posible «imaginar» —o solo lo es raras veces— esas leyes solo «pensando», sin mirar lo que «sucede ahí fuera». Y ahí entran los experimentos y observaciones. Pero para observar y medir se necesitan instrumentos, aparatos cuya sofisticación tecnológica se hace mayor según avanza la ciencia. Este hecho es aplicable al caso de la astronomía y la astrofísica, al estar los objetos —los cuerpos astronómicos— que estudia lejos, muy lejos, de nuestro entorno terrestre.

Comencemos por el Observatorio Lowell, en el que trabajó Slipher. Su nombre se debe al responsable de su existencia: Percival Lowell, un acaudalado hombre de negocios de Boston apasionado de la astronomía. En 1894, Lowell decidió

construir un observatorio astronómico en Flagstaff, localidad del estado de Arizona de una altitud media de 2.080 metros sobre el nivel del mar. Dos años más tarde, instaló allí un telescopio refractor de 61 centímetros que utilizó, sobre todo, para observar Marte, donde creyó identificar canales que, según él, revelaban que había albergado vida inteligente, idea que publicitó en tres libros: Mars (1895), Mars and its Canals (1906) y Mars as the Abode of Life (1908). Siguiendo programas observacionales parecidos, el 18 de febrero de 1930, Clyde William Tombaugh descubrió en Flagstaff el que fue considerado, hasta 2006, el noveno planeta del Sistema Solar: Plutón (a partir de 2006 se le clasifica como un «planeta enano»). Pero no son estos asuntos los que interesan aquí, sino otras observaciones que se hicieron en el Observatorio Lowell y de las que me ocuparé en la próxima sección, después de considerar ahora a los, mucho más poderosos, más deudores de las nuevas posibilidades tecnológicas, telescopios que se instalaron en California.

El telescopio reflector de 2,5 metros, que utilizó Hubble, fue uno de esos nuevos instrumentos que permiten realizar avances notables en el conocimiento de la naturaleza.[12] Su origen está ligado al nombre del astrofísico estadounidense George Ellery Hale (1868-1938), uno de los grandes pioneros de la astrofísica moderna. Lejos de limitarse a la investigación astronómica, Hale se involucró en la compleja tarea de intentar conseguir medios para que ese tipo de investigación, que requería de una financiación elevada, pudiese desarrollarse. Con la ayuda del banquero Charles T. Yerkes, que donó 300.000 dólares, Hale logró fundar el Observatorio Yerkes, situado en Williams Bay, Wisconsin. Inaugurado el 21 de octubre de 1897, dependía de la entonces joven Universidad de Chicago, de la que Hale era profesor. El espejo del telescopio Yerkes, de 1 metro, tardó cinco años en ser fabricado.

En 1896, Hale persuadió a su padre, William E. Hale, presidente de la Hale Elevator Company —una fábrica de ascensores— que donase los fondos necesarios para fabricar un espejo de 1,5 metros con el que se pudiesen fotografiar espectros estelares «en una escala lo suficientemente grande como para permitir el estudio de sus composiciones químicas, las temperaturas y presiones de sus atmósferas. Y sus movimientos con un alto grado de precisión».[13] William Hale aceptó, con la condición de que la Universidad de Chicago suministrara los fondos necesarios para montarlo. El espejo se fabricó en Francia (en la compañía Saint Gobain, que todavía existe), el pulido comenzó en 1905 y se tardó dos años en completarlo. Sin embargo, el dinero para instalarlo no llegó y así el espejo durmió durante algún tiempo el sueño de los justos en los sótanos

del Observatorio Yerkes hasta que en 1904 la Carnegie Institution de Washington D.C., fundada en 1902 por Andrew Carnegie, aportó el capital necesario. Con todo lo anterior, Hale fundó el Observatorio Solar en el Monte Wilson, un pico de 1.742 metros situado en las montañas de San Gabriel, cerca de Pasadena, al noreste de Los Ángeles. Dependía de la Carnegie Institution. De hecho, el Observatorio se inauguró, en diciembre de 1904, antes de disponer del nuevo telescopio. Provisto de un telescopio denominado «Snow» —en honor del padre de Helen Snow, quien había proporcionado el dinero para su fabricación— que había estado en el Observatorio Yerkes, pronto, en 1905-1906, Hale y Walter Adams lograron realizar las primeras fotografías de manchas solares, algo nunca antes conseguido. En 1908, doce años después de que su padre le hubiese dado el dinero para fabricar el espejo, el telescopio de 1,5 metros, entonces el mayor del mundo, fue finalmente inaugurado.

En 1906, por tanto, antes de que este gran telescopio comenzase a funcionar y, en consecuencia, sin poseer todavía experiencia acerca de los resultados que estos grandes telescopios podían producir, Hale presentó los planes para otro telescopio, este de 2,5 metros, a John D. Hooker, un rico industrial de Los Ángeles aficionado a la astronomía. Con él, señaló, se obtendría dos veces y media más luz que con el de 1,5 metros, «sobrepasaría, con mucho, todos los instrumentos que existen en la fotografía de estrellas y nebulosas, dando nueva información sobre su composición química, temperatura y presión de sus atmósferas».[14] Hooker donó el dinero para fabricar el espejo y la Carnegie Institution proporcionó el dinero para el resto. Al igual que en el caso del telescopio de 1,5 metros, la compañía francesa Saint Gobain fue encargada de proporcionar el cristal para el espejo. Este, de 256,5 centímetros de diámetro, 33 de espesor y 5 toneladas de peso, llegó a Estados Unidos, a Hoboken, en el estado de New Jersey, en barco, en noviembre de 1908. Los periódicos de Nueva York siguieron con atención lo que consideraron la mercancía más valiosa que jamás había cruzado el Atlántico pero, cuando en diciembre llegó a Pasadena para proceder a la exigente tarea de pulirlo, el técnico que tenía que hacerlo declaró que el vidrio no servía ya que contenía muchas pequeñas burbujas de aire en su interior. Saint Gobain se ofreció entonces a fabricar uno nuevo, sin cobrar nada, naturalmente, pero fracasó por diversas razones en sucesivos intentos. En esta frustrante situación, en 1910 se pidió a Arthur Day, vicepresidente de la Corning Glass Works Company, especialista en vidrio, que examinara el primero que había enviado Saint Gobain. Después de varias pruebas concluyó que, de hecho, las burbujas, situadas en una capa, reforzaban en lugar de debilitar el material y que al no estar cerca de la superficie no

interferirían en la formación de una superficie perfectamente lisa. Comenzó entonces la tarea del pulido, que llevó casi cinco años.[15] Completado por fin el espejo, el telescopio recibió la primera luz el 2 de noviembre de 1917 (la construcción del edificio y del domo para albergar el telescopio había comenzado en 1913). Apropiadamente, fue bautizado con el nombre «Hooker».[16]

Vemos, por consiguiente, lo difícil, caro y exigente desde el punto de vista tecnológico que resulta la construcción de observatorios astronómicos más poderosos que los existentes. El que estos se construyeran en Estados Unidos se debe entender como una muestra más del poderío económico que la nación norteamericana estaba experimentando desde finales del siglo XIX.

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO: VESTO SLIPHER Y EDWIN HUBBLE

En 1901, Percival Lowell adquirió un nuevo espectrógrafo para acoplar a su telescopio de Flagstaff. Para utilizarlo contrató a un joven astrónomo (ya nos apareció su nombre), Vesto Slipher (1875-1969). Animado por Lowell (que compatibilizaba sus negocios en Boston con su vocación astronómica), Slipher estudió los espectros de algunas nebulosas espirales, entre ellas la nebulosa (todavía no se hablaba de galaxias más que en el caso de la Vía Láctea) Andrómeda. Y de una serie de observaciones que efectuó entre noviembre y diciembre de 1912, concluyó que Andrómeda se estaba acercando al Sistema Solar. Veamos lo que escribió en el informe que bajo el título «La velocidad radial de la nebulosa Andrómeda» publicó en 1912 (Slipher 1912: 56-57):

Mediante sus espléndidas investigaciones sobre las nebulosas, Keeler demostró, entre otras cosas, que en general las nebulosas tienen forma espiral, y que tales nebulosas existen en número mucho más grande de lo que se suponía.[17] Estos hechos sugieren que la nebulosa espiral es uno de los productos más importantes de las fuerzas de la naturaleza. Se comprendió que los espectros de estos objetos proporcionarían información valiosa, y han sido estudiados, fotográficamente, por Huggins y Scheiner, y recientemente, con más amplitud, por Fath y Wolf; pero por lo que yo sé no se ha intentado determinar su velocidad radial, aunque el valor de semejante observación se le ha ocurrido a muchos investigadores.[18]

El principal obstáculo para tener éxito en semejante empresa es lo tenues que son estas nebulosas. Para cualquiera que no tenga experiencia en ese tipo de observaciones, es difícil imaginar la extrema debilidad de su luz dispersada, y sin duda parece extraño que la magnífica nebulosa espiral Andrómeda, que en el cielo transparente aparece de forma tan evidente al ojo desnudo, sea tan débil espectrográficamente.

Tras obtener la velocidad radial, Slipher continuó utilizando el espectrógrafo de Lowell para medir desplazamientos Doppler en nebulosas y cúmulos de estrellas. En la reunión de la American Astronomical Society celebrada del 25 al

28 de agosto de 1914 en la Northwestern University (Evanston, Illinois), en presencia de figuras de la astrofísica como H. N. Russell, E. Pickering, R. H. Curtis, Fath y Edwin Hubble, Slipher (1915) presentó los resultados que había obtenido durante los últimos años: medidas de las velocidades de 15 nebulosas espirales. La velocidad media que había encontrado era de 400 kilómetros por segundo, y era una velocidad de recesión (solo tres nebulosas se dirigían hacía el Sistema Solar). No es aventurado decir que Hubble debió tomar buena nota de aquellos resultados.[19]

Evidencia de que los resultados de Slipher no pasaron desapercibidos se encuentra en uno de los libros de Arthur Eddington, The Mathematical Theory of Relativity (1923), una obra extremadamente influyente en la que generaciones de estudiantes, físicos y astrónomos se familiarizaron con las teorías especial y, sobre todo, general de la relatividad. Allí, al estudiar las propiedades de la solución que encontró De Sitter, correspondiente a un universo vacío pero que, como apunté, se expandía (una partícula de prueba se alejaría del punto que se tomase como origen), Eddington (1923: 161) escribió:

Se puede comprobar fácilmente que no existe tal tendencia [expansión] en el Universo de Einstein [la solución que obtuvo Einstein de un universo estático]. Una partícula colocada en cualquier lugar, permanecerá en reposo [...] A veces se argumenta en contra del Universo de De Sitter que se hace no estático tan pronto como se inserta en él cualquier materia. Pero acaso esta propiedad favorezca la teoría de De Sitter en lugar de perjudicarla.

El que pudiese favorecerla tenía que ver con el siguiente hecho que Eddington mencionaba a continuación:

Uno de los problemas más sorprendentes de la cosmogonía es la gran velocidad de las nebulosas espirales. Su velocidad radial media es de alrededor de 600 km. por segundo, y existe una gran preponderancia de velocidades de recesión en el Sistema Solar. Habitualmente, se supone que estas [nebulosas] son los objetos más remotos conocidos (aunque esta opinión es rechazada por algunas autoridades), de manera que es ahí, y no en otro lugar, donde debemos buscar

efectos debidos a la curvatura del Universo. La teoría de De Sitter proporciona una doble explicación de este movimiento de recesión; primero, existe una tendencia general a desplazarse de acuerdo con la ecuación (70.22) [$(d^2r/ds^2) = \frac{1}{3}\cdot\lambda\cdot r$; que expresa la fuerza de alejamiento que experimenta una partícula de prueba en ese modelo]; segundo, está el desplazamiento general hacia el rojo de las líneas espectrales en objetos alejados, debido a la disminución de los periodos de las vibraciones atómicas, que erróneamente se interpretaría como un movimiento de recesión.

Y en este punto aparece Slipher (Eddington 1923: 162): «Las medidas más numerosas de velocidad radial de nebulosas espirales han sido realizadas por el Prof. V. M. Slipher, en el Observatorio Lowell. Amablemente, me ha preparado la siguiente tabla, que contiene muchos resultados aún no publicados». La lista en cuestión contenía la velocidad radial de 41 nebulosas espirales. Todas, menos tres, se alejaban del Sistema Solar, lo que daba origen al siguiente comentario de Eddington:

El gran predominio de velocidades positivas (recesión) sorprende mucho; pero la falta de observaciones de nebulosas del hemisferio sur es desafortunada, y nos impide llegar a una conclusión final. Incluso si esas muestran también una preponderancia de velocidades de recesión, la dificultad cosmológica acaso no se elimina completamente con la teoría de De Sitter. Vemos que dos nebulosas (incluyendo la gran nebulosa de Andrómeda) se están aproximando con una velocidad bastante grande y sucede que estas velocidades están excepcionalmente bien determinadas [...] Por consiguiente, es difícil explicar estos movimientos incluso como fenómenos excepcionales; por otra parte, una velocidad de aproximación de 300 km. por segundo es, más o menos, el límite alcanzado ocasionalmente por estrellas individuales o cúmulos de estrellas.

En definitiva, Eddington no sabía bien con qué carta quedarse, algo muy natural, a la vista de los conocimientos de que se disponía entonces y de la novedad que significaba la observación de tantas velocidades de alejamiento. Lo importante es que el problema estaba planteado. Sería Edwin Hubble quien daría, ocho años

más tarde, una respuesta concluyente.

El telescopio de 2,5 metros del Observatorio de Monte Wilson fue el que dispuso para sus observaciones Edwin P. Hubble (1889-1953). Graduado en Ciencias por la Universidad de Chicago en 1910, donde había seguido algunos cursos de astronomía, centrados en mecánica analítica y mecánica celeste, consiguió, sin embargo, una beca Rhodes para estudiar en Oxford, con la idea de convertirse en abogado; de hecho, allí estudió jurisprudencia durante dos años y, también, uno de español. No obstante, al regresar a Estados Unidos, y después de un año enseñando en un instituto, en 1914 pasó al Observatorio Yerkes como estudiante graduado en astronomía. Su tesis doctoral, Photographic investigations of faint nebulae (Investigaciones fotográficas de nebulosas débiles; 1917), atrajo la atención de Hale, ya director del Observatorio de Monte Wilson, que buscaba astrónomos para el telescopio de 2,5 metros que pronto iba a comenzar a entrar en funcionamiento. Así, en 1919, comenzó su carrera como astrónomo que le conduciría a uno de los descubrimientos científicos más importantes de toda la historia de la ciencia. Pero para ello necesitó de algo más que el telescopio de Monte Wilson; requirió de un «instrumento» preciso para la investigación astronómica: las estrellas cefeidas, denominadas así por su prototipo, «Delta Cephei», descubierta en 1786 por John Goodricke.

Las cefeidas son unas estrellas de luminosidad variable, que comenzó a estudiar en 1908 Henrietta Leavitt (1868-1921), una ayudante del Observatorio de Harvard. Lo que Leavitt (1912) descubrió, cuatro años después, es que existía una relación lineal entre el logaritmo del periodo de la variación de la luminosidad de las cefeidas que se observaban en la nube de Magallanes y la propia luminosidad (intrínseca, o absoluta). Este descubrimiento simplificó el procedimiento a seguir: (1) se medía el periodo y de este se podía deducir, mediante la relación mencionada, la luminosidad intrínseca de la cefeida; (2) como en el observatorio se mide la intensidad relativa, comparando ambas intensidades, intrínseca y relativa, es posible calcular, mediante sencillas reglas trigonométricas, la distancia a la que se encontraba la cefeida, con lo que se caracterizaba también la distancia de la agrupación estelar (una galaxia, por ejemplo) a la que pertenecía. Con este procedimiento, en 1917, Harlow Shapley, que todavía trabajaba en el Observatorio de Monte Wilson (después pasó al de Harvard; una mala opción), descubrió que el Sistema Solar no se encontraba en el centro de la Vía Láctea, sino en uno de sus brazos, y calculó las distancias y dimensiones a partir del pulso de las cefeidas.

A partir de 1921, Hubble comenzó a tomar fotografías de la nebulosa irregular NG 6822 con el telescopio «Hooker». En 1924 ya tenía más de 50 placas y 11 cefeidas, estableciendo la distancia de la nebulosa en 700.000 años-luz, una distancia mucho mayor que la estimación más extremada de los límites de nuestra galaxia. Al mismo tiempo que estudiaba NG 6822, Hubble se ocupaba de galaxias espirales, encontrando —de nuevo con la ayuda de cefeidas— que también ellas se hallaban a distancias superiores a las del tamaño de la Vía Láctea. De esta manera quedaba sentenciado el antiguo debate de la estructura del Universo, que habría que entender como un conjunto de galaxias separadas entre sí por inmensas distancias.

Aunque la palabra galaxia tenía un largo uso anterior, el descubrimiento de otras galaxias introdujo una nueva dimensión cósmica. Una galaxia media estaba formada por mil millones de estrellas y se extendía a lo largo de 100.000 años-luz de diámetro (este el caso de la Vía Láctea, en la que el Sistema Solar se encuentra a unos 26.000 años-luz del centro). Importante en este proceso científico-terminológico fue la identificación de las aglomeraciones vecinas a la Vía Láctea, las nubes de Magallanes, visibles desde el hemisferio sur, y la distancia a Andrómeda (2,3 millones de años-luz), que les valieron obtener el rango de galaxias.

Determinada la distancia de varias galaxias espirales, Hubble fue capaz de demostrar la existencia de una relación extremadamente importante entre la velocidad con que se mueven esas galaxias y su distancia. Lo hizo con la ayuda de Milton Humason —un hombre carente de educación formal, que empezó a trabajar como mulero en la construcción del Observatorio de Monte Wilson, empleo del que pasó, primero, a ayudante de astrónomos para obtener placas fotográficas y, luego, a astrónomo titular— y el procedimiento fue el siguiente: conocía la distancia de 5 galaxias (y una sexta compañera) a partir de cefeidas; con estas nebulosas calibró la magnitud media de la estrella más brillante en una galaxia, dato que utilizó para determinar la distancia de otras 14 galaxias. Empleó entonces estas 20 para calibrar la magnitud media de una nebulosa, utilizando el resultado para estimar la distancia de otras 4. Con las distancias de 24 de las 46 nebulosas extragalácticas para las que se había determinado su velocidad radial, Hubble (1929), primero en solitario y luego junto a Humason (Hubble y Humason 1931), anunció la existencia de una relación lineal entre distancia y velocidad radial (que conocía midiendo el desplazamiento —un efecto tipo Doppler— de los espectros de la radiación procedente de esas galaxias). El trabajo de Hubble tenía una interpretación directa: cuanto más

alejadas se encontraban las galaxias, más rápidamente se alejaban entre sí; se alejaban puesto que el desplazamiento observado era hacia el extremo rojo del espectro, no hacia el azul. Expresado en términos analíticos, el resultado de Hubble se formula como $v=H \cdot d$, donde v es la velocidad de expansión, H es una constante (aunque en realidad depende del tiempo: es, básicamente, la inversa de la edad del Universo), conocida como «constante de Hubble», y d la distancia a que se encuentra la galaxia. Se trata de una ley que describe la expansión del Universo sin explicar la causa.

Considerado retrospectivamente, parece que la interpretación inmediata era que debió existir en el pasado un momento en el que toda la materia habría estado concentrada en una pequeña extensión: el «átomo primitivo» de Lemaître, o, un nombre que ha tenido más éxito, el Big Bang (Gran Estallido). Sin embargo, como veremos en el próximo capítulo, no fue esa la única interpretación, ni durante algún tiempo la más influyente.

RELATIVIDAD Y FILOSOFÍA

Como veremos más adelante en este capítulo, la revolución cuántica —entendiendo por tal la que condujo a las mecánicas cuánticas de Heisenberg, Schrödinger y Dirac, más la interpretación debida a Max Born de la función de onda y el principio de incertidumbre— produjo enseguida, durante la primera mitad del siglo XX, otras «pequeñas revoluciones dentro de la revolución», que tendrían enormes consecuencias en el desarrollo de la física. Con las dos teorías de la relatividad einsteiniana, solo la cosmología relativista se puede equiparar a una «pequeña revolución dentro de la revolución», aunque en realidad su estatus científico fue diferente a lo que sucedió en el mundo cuántico, ya que, de hecho, se trató de una, más o menos, directa aplicación de la relatividad general al conjunto del Universo, que de entrada no incidió en los trabajos de astrónomos y astrofísicos. Además, las ecuaciones de la cosmología relativista permitían una infinitud de posibles universos, vacíos o llenos, estáticos o dinámicos (contrayéndose o expandiéndose), algo que, de alguna manera, reducía su impacto.

El campo en el que la relatividad se hizo sentir con más intensidad durante la primera mitad del siglo XX, fue el de la filosofía, algo no demasiado sorprendente, habida cuenta de los profundos cambios que introdujo en conceptos de tanto calado filosófico (ontológico y epistemológico) como el espacio, el tiempo y la causalidad.[20] La influencia fue tal que no se puede comprender la historia de la filosofía de la primera parte del siglo XX sin tener la relatividad en cuenta. Veamos algunos ejemplos.[21]

Moritz Schlick (1882-1936) fue uno de los primeros y más activos «misionarios» de la relatividad de Einstein en el mundo filosófico. Estudiante de Max Planck, bajo cuya dirección obtuvo un doctorado en física en 1904 con una tesis sobre la reflexión de la luz en un medio inhomogéneo, Schlick se dedicó después a la filosofía viéndose pronto atraído por las muchas posibilidades filosóficas de la relatividad, como se puede ver, por ejemplo, en un artículo que publicó en 1915: «El significado filosófico de la teoría de la relatividad». Dos años más tarde, publicaba un pequeño libro titulado Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik (Espacio y tiempo en la física actual), que apareció inicialmente en dos partes en el semanario científico Die Naturwissenschaften

(Schlick 1917).

Schlick es recordado sobre todo, y ahí reside una parte de su importancia, por ser el líder del denominado «Círculo de Viena», un grupo de filósofos y científicos con preocupaciones filosóficas que comenzaron a reunirse hacia 1922, como Herbert Feigl, Hans Hahn, Philipp Frank, Kurt Gödel, Victor Kraft, Otto Neurat y Friedrich Waismann. En realidad, la influencia del Círculo no se limitaba a Viena, extendiéndose más allá; por ejemplo, a Berlín, en donde entonces se encontraba Reichenbach (existieron también conexiones entre el Círculo, Karl Popper y Ludwig Wittgenstein).[22] Que el Círculo de Viena, y el positivismo lógico, con el que está íntimamente ligado (aunque no haya que reducir completamente este a aquel), han sido una parte importante de la filosofía del siglo XX, es algo que pocos negarán. Pues bien, ocurre que la filosofía del Círculo de Viena tomó buena nota de las enseñanzas epistemológicas y metodológicas que se derivan de la relatividad. Si se prefiere, basta con decir que muchos de los miembros del Círculo de Viena se vieron muy influidos por las nuevas teorías de Einstein.

Otros filósofos distinguidos que se ocuparon de la relatividad fueron Ernst Cassirer (1874-1945) y Hans Reichenbach (1891-1953). Aunque ambos se iniciaron y establecieron sus credenciales filosóficas en Alemania, terminarían abandonándola estableciéndose en los Estados Unidos, los dos como catedráticos de filosofía: Cassirer en la Yale University desde 1932, y Reichenbach en la Universidad de California, Los Ángeles, a partir de 1938.

Cassirer, que se había formado en la escuela neokantiana de Marburgo, fue uno de los filósofos que reconocieron que tenían que revisar sus puntos de vista filosóficos de manera que fuesen consistentes con las teorías relativistas de Einstein. En su caso, se interesó especialmente por comprobar si la visión filosófica del mundo que había presentado en su Substanzbegriff und Funktionsbegriff (Sustancia y función; Cassirer 1910), y que estaba dominada por las concepciones newtonianas de espacio y tiempo, era consistente con el nuevo universo relativista. Fruto de sus nuevos intereses fue un libro que publicó en 1921: Zur Einstein’schen Relativitätstheorie (Sobre la teoría de la relatividad de Einstein). Escribía Cassirer (1921; 1953: 349) en el prefacio de esta obra: «El siguiente ensayo no pretende ofrecer una descripción completa de los problemas filosóficos suscitados por la teoría de la relatividad. Soy consciente de que los nuevos problemas que esta teoría presenta a la crítica general del conocimiento solo se pueden resolver mediante el trabajo paciente de físicos y filósofos; aquí

me he limitado a comenzar este trabajo, estimulando la discusión y, allí donde ha sido posible, guiándolo hacia direcciones metódicas, que contrastan con la incertidumbre de los juicios que todavía predomina».

En cuanto a Hans Reichenbach, había estudiado ingeniería en la Technische Hochschule de Stuttgart entre 1910 y 1911 pero, dándose cuenta de que sus intereses eran sobre todo teóricos, se dedicó a estudiar matemáticas, física y filosofía en las universidades de Berlin, Múnich y Gotinga, donde tuvo como profesores a científicos como Planck, Sommerfeld, Hilbert y Born, y filósofos como Ernst von Aster y Ernst Cassirer. Él mismo recordó los comienzos de su carrera en un esbozo autobiográfico publicado inicialmente en 1932 (Reichenbach 1978: 2):

Debido a mi trabajo en el cuerpo de radio del ejército, me vi implicado en la radio-tecnología, y durante el último año de la guerra [la Primera Guerra Mundial], tras haber dejado el servicio activo a causa de una grave enfermedad que había contraído en el frente ruso, comencé a trabajar como ingeniero para una compañía de Berlín especializada en la radio-tecnología (desde 1917 hasta 1920). Durante este periodo, y como físico que era, dirigí el laboratorio de altavoces de esta compañía. También me casé. Poco después murió mi padre y durante algún tiempo no pude dejar mi puesto de ingeniero puesto que tenía que ganar un salario para que mi esposa y yo pudiésemos vivir. Sin embargo, en mi tiempo libre estudié la teoría de la relatividad; asistí a las clases de Einstein en la universidad de Berlín... La teoría de la relatividad me impresionó inmensamente y me llevó a un conflicto con la filosofía de Kant. La crítica de Einstein al problema del espacio-tiempo me hizo darme cuenta de que el concepto de a priori de Kant no se puede mantener. Presenté el resultado de este profundo cambio en un librito titulado Relativitätstheorie und Erkenntnis Apriori [1920].

Da una idea de las intenciones de Reichenbach lo que escribió a Einstein el 15 de junio de 1920, cuando le pedía permiso para dedicarle su libro Relativitätstheorie und Erkenntnis Apriori (La teoría de la relatividad y el conocimiento a priori):[23] «Sabe usted que con este trabajo mi intención ha sido exponer las consecuencias filosóficas de su teoría y presentar los grandes descubrimientos que su teoría física ha provocado en la epistemología [...] Sé

muy bien que muy pocos de los filósofos establecidos se han percatado de que su teoría es un logro filosófico y que sus concepciones físicas contienen más filosofía que todos los trabajos de muchos volúmenes producidos por los epígonos del gran Kant. Permítame, por consiguiente, expresar el agradecimiento que le debo, con este intento de liberar a las profundas percepciones de la filosofía kantiana de sus ataduras contemporáneas reuniéndola con sus descubrimientos en un solo sistema».

Reichenbach respetó la obra de Einstein toda su vida. Por ejemplo, fue uno de los que contribuyó al volumen Albert Einstein: Philosopher-Scientist. En su artículo en esta obra, Reichenbach (1949: 290) resumió espléndidamente las implicaciones filosóficas de la relatividad:

Constituiría una equivocación creer que la teoría de Einstein no es una teoría filosófica. Este descubrimiento de un físico tiene consecuencias radicales para la teoría del conocimiento. Nos obliga a revisar ciertas concepciones filosóficas que han desempeñado un papel importante en la historia de la filosofía, y ofrece soluciones a ciertas cuestiones que son tan viejas como la propia historia de la filosofía y que no pudieron ser contestadas antes. El intento de Platón de resolver el problema de la geometría como una teoría de ideas, y el de Kant de describir la naturaleza del espacio y el tiempo mediante un «reine Anschauung» y una filosofía trascendental, constituyen respuestas a las mismas cuestiones a las que la teoría de Einstein ha dado una contestación diferente posteriormente. Si las doctrinas de Platón y Kant son teorías filosóficas, entonces la teoría de la relatividad de Einstein es filosófica y no meramente un asunto físico. Y las cuestiones a las que se hace referencia no son secundarias, sino de importancia primaria para la filosofía; algo que es evidente sin más que ver la posición central que ocupan en los sistemas de Platón y Kant. Estos sistemas son insostenibles si se coloca la respuesta de Einstein en el lugar de las respuestas que dieron a las mismas cuestiones sus autores; sus fundamentos se ven socavados cuando el espacio y el tiempo no son las revelaciones de una visión que se produce en el mundo de las ideas, o de una visión que surge de la razón pura, que un apriorismo filosófico pretende haber establecido. El análisis del conocimiento ha sido siempre el tema básico de la filosofía; y si el conocimiento en un dominio tan fundamental como el del espacio y el tiempo se ve sujeto a revisión, las implicaciones de tal crítica afectarán a toda la filosofía.

Otra referencia incuestionable al considerar la relatividad y la filosofía germana en la década de 1920 es Rudolf Carnap (1891-1971), cuya tesis doctoral, Der Raum (Sobre el espacio, 1921), también tuvo que ver con los «temas einsteinianos». En la «Autobiografía intelectual» que preparó para el volumen que Paul Schilpp le dedicó en la serie The Library of Living Philosophers, Carnap explicó tanto el origen de su tesis como el contenido de esta. Hacia 1919, explicaba, había estudiado los Principia Mathematica de Alfred North Whitehead y Bertrand Russell, al que Gottlob Frege, cuyos cursos «Begriffsschrift I y II» (Notación conceptual, ideografía) había seguido (en Jena) en 1910 y 1913, respectivamente, a veces mencionaba. Especialmente, le impresionó el desarrollo de la teoría de relaciones que se incluía en esta magna obra. Señalaba Carnap (1963: 11):

En particular, comencé la construcción de un sistema de axiomas para una teoría física del espacio y el tiempo, utilizando como primitivas dos relaciones, la coincidencia C de los puntos de universo de dos elementos físicos, y la relación temporal T entre los puntos de universo del mismo elemento físico. Escribí un breve esbozo del trabajo, llamado «Fundamentos axiomáticos de la cinemática» y se lo mostré al profesor Max Wien, el director del Instituto de Física de la Universidad de Jena. Después de que le diese algunas explicaciones, dijo que podía ser un proyecto interesante pero ciertamente no en física. Sugirió que podía enseñar el esbozo al profesor Bruno Bauch con el que yo había estudiado filosofía. Bauch se mostró más interesado, pero su veredicto final fue que este proyecto pertenecía a la física más que a la filosofía. Me aconsejó que lo presentase al profesor Wien. Pero al final llegamos al acuerdo de que escogería otro proyecto en filosofía, a saber los fundamentos filosóficos de la geometría. «Esta experiencia con mi proyecto de tesis», añadía en un comentario que será familiar para muchos de aquellos que han buscado moverse por territorios parecidos, «que parecía no pertenecer ni a la física ni a la filosofía, me hizo ver con claridad, por primera vez, las dificultades con que continuamente tendría que enfrentarme en el futuro. Si uno está interesado en las relaciones entre campos que, según las divisiones académicas habituales, pertenecen a departamentos diferentes, entonces uno no es bienvenido como un constructor de puentes, como habría podido esperar, sino que será considerado, por ambos lados, más bien como un extraño y un problemático intruso.

Lo que Carnap decía en su autobiografía nos ayuda a matizar la influencia que tuvieron las teorías especial y general de la relatividad de Einstein en la filosofía y los filósofos de, al menos, las dos primeras décadas del siglo XX. Es cierto que la aparición de esas dos teorías, con sus novedosos, profundos y radicales análisis de los conceptos de espacio y tiempo, atrajo la atención de muchos filósofos que de otra forma, acaso, hubiesen dedicado sus esfuerzos a otras cuestiones filosóficas. Ahora bien, no es menos cierto, como la cita de Carnap muestra con claridad, que antes incluso de 1905, el año en que Einstein presentó públicamente su teoría de la relatividad especial, existía una cierta, en modo alguno desdeñable, tradición de análisis (o investigación) filosófico que tenía al concepto de espacio como protagonista. Es obligado mencionar en este punto los ensayos de Hermann von Helmholtz titulados «Über die Tachsachen, die der Geometrie zu Grunde liegen» («Sobre los hechos que subyacen en la geometría»; 1858) y «Über den Ursprung die Bedeutung der geometrische Axiome» («Sobre el origen y significado de los axiomas de la geometría»; 1870). Igualmente obligado es recordar los tres artículos que Ernst Mach publicó en los números de abril de 1901, julio de 1902 y octubre de 1902 de The Monist: «On physiological, as distinguished from geometrical, space» («Sobre el espacio fisiológico, como diferente del geométrico»), «On the psychology and natural development of geometry» («Sobre la psicología y desarrollo natural de la geometría») y «Space and geometry from the point of view of physical inquiry» («Espacio y geometría desde el punto de vista de la investigación física»).

Otra muestra, en esta ocasión en el orden temporal, de lo extendidas que se encontraban a primeros de siglo, antes de que Einstein publicase su teoría de la relatividad especial, las reflexiones sobre la naturaleza del espacio y el tiempo la encontramos en el matemático francés Henri Poincaré. En efecto, basta con leer esa serie maravillosa de sus libros de carácter general (constituidos por la reunión de artículos que había publicado antes en revistas) La science et l'hypothèse (La ciencia y la hipótesis; 1902), Le valeur de la science (El valor de la ciencia; 1905), Science et méthode (Ciencia y método; 1908) o el póstumo Dernières pensées (Últimos pensamientos; 1913), para comprobarlo. Es verdad que, en algunos de esos artículos, Poincaré utilizaba argumentos no demasiado alejados a los que utilizó Einstein, pero no siempre. Así, por ejemplo, en El valor de la ciencia se ocupaba con cierta extensión no solo del espacio desde el punto de vista de la matemática o de la física, sino también, al igual que Mach, del «espacio visual», o del «espacio táctil». De hecho, podemos leer frases que encajan más en la tradición, digamos, helmholtziana que en la einsteiniana (Poincaré 1964: 86): «¿De dónde proviene el carácter cuantitativo del espacio?

Del papel que desempeñan en su génesis las series de sensaciones musculares. Son series que pueden repetirse, y de esa repetición proviene el número; porque pueden repetirse indefinidamente, el espacio es infinito. En fin, hemos visto, al final del parágrafo 3, que también por eso el espacio es relativo. Así, la repetición es la que ha dado al espacio sus caracteres esenciales; ahora bien, la repetición supone el tiempo; es suficiente decir que el tiempo es lógicamente anterior al espacio».

Otro ejemplo destacado de filósofo que reaccionó ante las teorías de Einstein es Karl Popper (1902-1994) que, aunque no fue un miembro del Círculo de Viena, sí que mantuvo, como ya apunté, lazos con él. Con Popper, especialmente después de la publicación, en 1934, de su Logik der Forschung (Lógica de la investigación científica), libro enormemente influyente, especialmente una vez traducido al inglés (Popper 1959), cobró fuerza una de las ramas de la filosofía de la ciencia que más popularidad alcanzó en el siglo XX, tanto entre los filósofos como entre científicos y público en general: la metodología de la ciencia. Pues bien, las ideas de Popper en este área surgieron en buena medida como una reflexión filosófica ante los trabajos de Einstein. Dejemos que sea el propio Popper (1976: 28-29), quien, en su autobiografía, lo explique:

Volviendo la vista hacia aquel año [1919] me maravilla el que, en un periodo tan corto, le pueda ocurrir tanto al desarrollo intelectual de uno. Puesto que fue en aquella época cuando supe acerca de Einstein; y esto llegó a ser una influencia dominante en mi pensamiento, a la larga tal vez la influencia más importante de todas...

[Max Elstein] me llamó la atención ante el hecho de que el mismo Einstein consideraba como uno de los principales argumentos en favor de su teoría [de la relatividad general] el que condujese a la de Newton como una aproximación muy buena; también, el que Einstein, aunque convencido de que su teoría era una aproximación mejor que la de Newton, la considerase como meramente un paso hacia una teoría todavía más general [...]

Sin duda alguna, Einstein tenía todo esto, y especialmente su propia teoría, en mente cuando, en otro contexto, escribió: «No podría existir mejor destino para una teoría física que el que señalase el camino hacia una teoría más amplia, en la que continuase viviendo como un caso límite». Pero lo que más me impresionó

fue la clara afirmación de Einstein en el sentido de que consideraría su teoría insostenible si no pasase ciertas pruebas. Así escribió, por ejemplo: «si el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales debido al potencial gravitatorio no existiese, entonces no se podría seguir manteniendo la teoría de la relatividad general».

Aquí teníamos una actitud radicalmente diferente de la dogmática de Marx, Freud y Adler, y aún más de la de los seguidores de estos. Einstein estaba buscando experimentos cruciales.

Esta, sentí entonces, era la verdadera actitud científica. Radicalmente diferente de la actitud dogmática que constantemente anunciaba el hallazgo de «verificaciones» para sus teorías favoritas.

Así es como llegué, hacia finales de 1919, a la conclusión de que la actitud científica era la actitud crítica, que no buscaba verificaciones sino pruebas cruciales; pruebas que podrían refutar la teoría que se está cuestionando, pero que nunca la podrían establecer.

Aunque hasta ahora únicamente he mencionado filósofos germano-hablantes, la relatividad einsteiniana también penetró con fuerza en otros entornos. Así sucedió, por ejemplo, en una nación bastante diferente, Gran Bretaña.[24] Este caso es interesante porque muestra con claridad el impacto que causaron las teorías de Einstein, en particular a raíz del anuncio de los resultados del eclipse de 1919.

Cuando se estudia la filosofía británica del primer cuarto del siglo (dos elementos importantes para tal estudio son las revistas Mind y Proceedings of the Aristotelian Society) nos encontramos con que, con anterioridad a 1920, las referencias a la relatividad einsteiniana fueron muy pocas y prácticamente limitadas a la teoría especial, a la que en general se veía como un apartado del electromagnetismo, que, en manos de Hermann Minkowski, podía conducir a ciertas implicaciones acerca de la estructura, euclidiana o no, del espacio (un caso diferente es el de Alfred North Whitehead, quien desarrolló su propia teoría de la relatividad).[25] Fue especialmente entre 1920 y 1925 cuando los filósofos británicos más comentaron la relatividad; se escribieron libros y artículos, y la Aristotelian Society y la Mind Association organizaron debates. Entre los

filósofos más activos durante aquel periodo se encuentran Whitehead, H. Wildon Carr, C. D. Broad, Richard B. Haldane, Dorothy Wrinch y Bertrand Russell. Pero no fueron los únicos. Un hecho digno de destacar es que aunque ciertamente existieron filósofos que se oponían a la relatividad, obstinándose en no abandonar un mundo, el newtoniano, en el que las certidumbres (lo absoluto) eran, pensaban, más firmes, la mayor parte de los filósofos británicos que participaron en la discusión de las implicaciones filosóficas de la relatividad no solo la aceptaban, sino que también argumentaban que los planteamientos einsteinianos favorecían sus propios puntos de vista filosóficos. Idealistas y realistas, en particular (recuérdese que la polémica idealismo versus realismo se había sentido con bastante crudeza en la filosofía británica), defendían sus propios esquemas ayudándose de la relatividad. Al repasar los libros y artículos de aquellos años, uno se llega a perder en una auténtica maraña de argumentos y contra-argumentos relacionados con qué es lo que implicaba la relatividad o qué era lo que Einstein había querido decir. Algunos ejemplos tomados de la discusión organizada por la Aristotelian Society y que tuvo lugar el 20 de febrero de 1922, con la participación de Carr, Nunn, Whitehead y Wrinch (1922), servirán para ilustrar este punto. Para el idealista Wildon Carr la teoría de Einstein era «una interpretación científica de la experiencia basada en el principio de relatividad. Este principio está en completo acuerdo con la doctrina neo-idealista en filosofía, y en total desacuerdo con el punto de vista fundamental de toda forma de neo-realismo». Por contra, el realista Nunn argumentaba que, al igual que Einstein, los neo-realistas «habían enseñado explícitamente que las varias apariencias de la “misma cosa” para diferentes observadores no son reacciones mentales diversas ante una idéntica causa material, sino que son datos de los sentidos o “sucesos” que pertenecen a una única secuencia histórica». Finalmente, Dorothy Wrinch —una graduada en matemáticas y filosofía por el Girton College de Cambridge y que durante un tiempo fue pupila de Russell— pensaba que la teoría de la relatividad no tenía nada que ver ni con idealismo ni con realismo (de hecho, Wrinch utilizó las teorías de Einstein para apoyar sus propios planteamientos, muy influidos por un logicismo à la Whitehead y Russell).

En cuanto a Bertrand Russell, conviene detenerse un poco más en él, puesto que fue uno de los filósofos británicos que más se ocupó de las teorías de la relatividad de Einstein, aunque con frecuencia más como divulgador que como filósofo realmente preocupado por las consecuencias que para su disciplina tenían las nuevas teorías.[26] Mostrando aquí también su agudeza de percepción, Russell señaló el oportunismo filosófico que exhibieron muchos de sus colegas

filósofos cuando extraían consecuencias filosóficas de la relatividad. Así, en un artículo titulado «Consecuencias filosóficas de la relatividad», que publicó en 1926 escribía (Russell 1926: 331): «Ha existido una tendencia, no rara en el caso de una nueva teoría científica, de que todo filósofo interprete el trabajo de Einstein de acuerdo con su propio sistema metafísico, y que sugiera que el resultado es un gran fortalecimiento de las opiniones que el filósofo en cuestión mantenía previamente. Esto no puede ser cierto en todos los casos; y puede esperarse que no sea cierto en ninguno. Sería decepcionante si un cambio tan fundamental como el que ha introducido Einstein no implicase ninguna novedad filosófica».

Philipp Frank, uno de los miembros del Círculo de Viena y sucesor de Einstein en Praga, escribió en 1949 algo no demasiado diferente a lo que sostenía Russell (Frank 1949: 352): «Es justo decir que incluso prominentes hombres de entre los seguidores y los que reconstruían la filosofía tradicional, no eran capaces de reconocer correctamente los cambios que debían de realizar para integrar el trabajo de Einstein en los esquemas tradicionales. Hombres de gran intelecto e imaginación como Henri Bergson, Ernst Cassirer o A. N. Whitehead intentaron en vano realizar contribuciones para una mejor comprensión y asimilación de las nuevas teorías de Einstein. Omito mencionar aquí aquellos filósofos que simplemente afirmaron de una manera superficial que la teoría de Einstein impulsaba su filosofía favorita. Según algunas interpretaciones, la teoría de Einstein muestra, por ejemplo, que la física tiene que ver con la mente y no con la materia, o, contrariamente, que los conceptos de espacio y tiempo no se refieren a algunas entidades abstractas sino a cuerpos materiales».

UNA NUEVA REVOLUCIÓN: LA FÍSICA CUÁNTICA

La segunda gran revolución de la primera mitad del siglo XX, y una de las mayores —si no la mayor— de toda la historia de la física, es la de la física cuántica.[27] Las raíces de esa física se encuentran en el siglo XIX. Aunque no es rigurosamente exacto, hay sobrados argumentos para considerar que el punto de partida de esta revolución —desde luego de su dimensión cuántica— tuvo lugar en 1900, cuando el físico alemán Max Planck (1858-1947), mientras estudiaba la distribución de energía en la radiación de un cuerpo negro, introdujo la ecuación $E=h\cdot\upsilon$, donde E representa la energía, h es una constante universal (denominada posteriormente «constante de Planck») y υ la frecuencia de la radiación involucrada (Planck 1900). Aunque Planck se resistió de entrada a apoyar la idea de que este resultado significaba que, de alguna manera, la radiación electromagnética (esto es, la luz, una onda continua como se suponía hasta entonces) se podía considerar también como formada por «corpúsculos» (posteriormente denominados «fotones») de energía $h\cdot\upsilon$, semejante implicación terminó imponiéndose, siendo en este sentido Einstein (1905 b) decisivo: «Las observaciones asociadas con la radiación del cuerpo negro, la fluorescencia, la producción de rayos catódicos mediante luz ultravioleta y otros fenómenos relacionados, todos ellos conectados con la emisión o transformación de la luz», señalaba en la introducción del artículo (Einstein 1905 a: 133) en el que presentó sus resultados, «se entienden más fácilmente si se supone que la energía de la luz está distribuida espacialmente de forma discontinua». Se trataba, no obstante, de una tesis radical, que rompía con el cuerpo de conocimientos canónico de la física. Explicaba, es cierto, algunos fenómenos problemáticos desde el punto de vista de la física clásica (como el efecto fotoeléctrico) pero si, de alguna manera, la luz estaba formada por «partículas» de energía, entonces: ¿por qué la teoría ondulatoria de la luz ha tenido tanto éxito hasta ahora?, o, ¿cómo se pueden incorporar al esquema «cuántico» fenómenos del tipo de la interferencia o la difracción? La respuesta —el comentario más bien— de Einstein (1905 a: 132-133) a estos interrogantes se encuentra en la introducción del trabajo, donde escribía: «La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones continuas en el espacio, ha funcionado bien en la representación de fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a medias temporales más que a valores instantáneos, y a pesar de la completa verificación

experimental de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., es imaginable que una teoría de la luz que utilice funciones continuas en el espacio conduzca a contradicciones con la experiencia, si se aplica a los fenómenos de la producción y la transformación de la luz».

De esta manera, aparecía la primera de las propiedades contraintuitivas de la física cuántica, la «dualidad onda-corpúsculo», que desarrollaría más tarde Louis de Broglie (1924). Richard Feynman expresó bien el carácter revolucionario de esta propiedad (comprobada experimentalmente en 1924 por Clinton Davisson y Lester Germer, por un lado, y George Thomson y Alexander Reid, por otro) en uno de sus libros, Six Easy Pieces (Feynman 1995 a: 116):

La «mecánica cuántica» es la descripción del comportamiento de la materia en todos sus detalles y, en particular, de lo que sucede a escala atómica. Las cosas a una escala muy pequeña no se comportan como nada de lo que ustedes tengan experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, no se comportan como nubes, o como bolas de billar, o como pesos colgados de muelles, o como nada que ustedes hayan visto alguna vez.

Newton pensaba que la luz estaba hecha de partículas, pero luego se descubrió que se comporta como una onda. Sin embargo, posteriormente (a comienzos del siglo XX) se encontró que la luz sí se comporta como una partícula, y luego se encontró que en muchos aspectos se comportaba como una onda. Así que realmente no se comporta como ninguna de las dos cosas. Ahora hemos cedido. Decimos: «No es ni una cosa ni otra».

Hay, no obstante, una feliz circunstancia: los electrones se comportan exactamente igual que la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones y demás) es el mismo para todos; todos son «partículas-ondas» o como quiera que ustedes prefieran llamarlos.

Durante un cuarto de siglo, los físicos pugnaron por dar sentido a los nuevos fenómenos cuánticos, a los que terminaron integrándose también otros fenómenos descubiertos o desarrollados, pero no explicados, en el siglo XIX: la radiactividad, la espectroscopia y el problema de en qué consiste la materia. No

es posible ofrecer aquí ni siquiera un esbozo del número de científicos que trabajaron en este campo, de las ideas que manejaron y los conceptos que introdujeron, ni de las observaciones y experimentos realizados. Es obligado, no obstante, mencionar el modelo atómico que el físico danés Niels Bohr (1885-1962) propuso en 1913. Bohr dio cuenta de que para construir un modelo satisfactorio de átomo tenía que incluir de alguna manera el cuanto de energía de Planck-Einstein en el modelo atómico que Ernest Rutherford (1911) había desarrollado antes. En su artículo (Bohr 1913: 2) escribió: «Cualquiera que sea la modificación en las leyes del movimiento de los electrones parece necesario introducir una cantidad ajena a la electrodinámica clásica; esto es, la constante de Planck [h]». Para ello, consideró el átomo de hidrógeno formado por un núcleo de carga +e, en torno al cual gira, siguiendo una órbita circular y a una distancia, r (a determinar), un electrón (carga -e). Combinando la mecánica clásica con la electrostática, suponiendo que las órbitas eran estacionarias, esto es que no emitían radiación, e introduciendo una expresión que cuantizaba (que permitía solo ciertos valores discretos, múltiplos de h) el momento angular de las órbitas electrónicas, obtuvo una fórmula que daba r en función de h y de un número entero, el primer «número cuántico» introducido en la física cuántica. Por consiguiente, el radio de las órbitas no podía disminuir (ni aumentar) gradualmente, sino que debía hacerlo de manera discontinua, a saltos, de manera cuántica. Se había eliminado la dificultad de la inestabilidad electromagnética del átomo de Rutherford.

Uno de los principales logros del modelo atómico de Bohr fue su capacidad para explicar las relaciones matemáticas asociadas a diferentes grupos de líneas espectrales, que habían sido descubiertas «jugando con números» por Johann Jacob Balmer y Johannes Robert Rydberg, y que la física anterior a Bohr se había mostrado incapaz de explicar. También en base a este modelo atómico, aunque perfeccionado (tal y como se presentó en 1913, no servía bien más que para el hidrógeno), el propio Bohr fue capaz de explicar la tabla periódica de los elementos de Mendeleiev.

Con estos y otros mimbres (como las fórmulas semiempíricas de Alfred Landé para explicar el efecto Zeeman anómalo; el experimento de 1923 de Arthur Holly Compton, que reafirmaba el aspecto corpuscular de la luz que Einstein había puesto en evidencia en 1905, y en el que muy pocos creían; la dualidad onda-corpúsculo de Louis de Broglie; o el principio de exclusión de Pauli), un joven físico alemán de nombre Werner Heisenberg (1901-1976) desarrolló, en 1925, la primera formulación coherente de una mecánica cuántica (Heisenberg

1925): la mecánica cuántica matricial, en la que aparecía una propiedad hasta entonces extraña a los físicos, aunque no a los matemáticos familiarizados con la multiplicación de matrices: la no conmutatividad; esto es, que el producto de dos magnitudes físicas determinadas era diferente según el orden en que estas se multiplicaban. Poco después, en una serie de artículos publicados en 1926 bajo el título «Quantisierung als Eigenwertproblem» («Cuantización como problema de autovalores»), el austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961) encontraba una nueva formulación (aunque pronto se comprobó que ambas eran equivalentes): la mecánica cuántica ondulatoria, en la que el ente básico eran ondas definidas en el espacio de los números complejos (Schrödinger 1926 a, b, c). De hecho, hubo una tercera versión, más «algebraica», de mecánica cuántica, debida al británico Paul A. M. Dirac (1902-1984). Gracias a que este tuvo acceso al artículo de Heisenberg en pruebas, Dirac (1925) publicó su versión antes que la de Schrödinger.

Si la exigencia de la constancia de velocidad de la luz contenida en uno de los dos axiomas de la teoría de la relatividad especial, la dependencia de las medidas espaciales y temporales del movimiento del observador o la curvatura dinámica del espacio-tiempo constituían resultados no solo innovadores sino sorprendentes, que violentan nuestro «sentido común», mucho más chocantes resultaron ser los propios de la mecánica cuántica, de los que es obligado recordar al menos dos: (1) la interpretación de la función de onda de la ecuación de Schrödinger debida a Max Born (1882-1970), según la cual tal función —el elemento básico en la física cuántica para describir el fenómeno considerado— representa a través de su cuadrado la probabilidad de que se dé un resultado concreto (Born 1926); y (2) el principio de incertidumbre (Heisenberg 1927), que sostiene que determinadas parejas de magnitudes (denominadas canónicamente conjugadas) como la posición y la velocidad, o la energía y el tiempo, solo se pueden determinar simultáneamente con una indeterminación característica de valor igual o superior a la constante de Planck; así, $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$, donde x representa la posición y p el momento lineal (el producto de la masa por la velocidad). A partir de este resultado, al final de su artículo Heisenberg (1927; Wheeler y Zurek, eds. 1983: 83) extraía una conclusión con implicaciones filosóficas de largo alcance: «En la formulación fuerte de la ley causal “si conocemos exactamente el presente, podemos predecir el futuro”, no es la conclusión, sino más bien la premisa la que es falsa. No podemos conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles». Y añadía: «En vista de la íntima relación entre el carácter estadístico de la teoría cuántica y la imprecisión de toda percepción, se puede sugerir que detrás del universo

estadístico de la percepción se esconde un mundo «real» regido por la causalidad. Tales especulaciones nos parecen —y hacemos hincapié en esto— inútiles y sin sentido. Ya que la física tiene que limitarse a la descripción formal de las relaciones entre percepciones».

Con todos los elementos citados —rechazados firmemente por físicos como Einstein o Planck— se elaboró lo que se denominó «Interpretación de Copenhague» de la mecánica cuántica, por el papel destacado que Niels Bohr desempeñó en su formulación y, acaso aún más, en su divulgación. Esta interpretación se puede resumir de la siguiente manera. La función de onda que surge de la ecuación de Schrödinger está constituida por la suma de una serie de funciones, asociadas a las diferentes situaciones físicas posibles, multiplicadas cada una por un cierto valor (se trata, recordemos el título de los artículos de Schrödinger, de un problema matemático de autovalores de operadores). En principio, si no se produce ninguna «interferencia» con el exterior, el sistema dado por la función de onda principal evoluciona de manera continua, regida por la ecuación de ondas de Schrödinger. Pero esta situación dominada por la continuidad, y en este sentido similar a la que se da en la física clásica, no se mantiene cuando se realizan medidas. Y en este punto hacía su entrada «el observador» (o el «aparato con el que se realiza la medida»), que en la física cuántica es, según la interpretación de Copenhague, especialmente importante. Existe, supuso Bohr, una separación neta entre objeto observado y aparato observador, con el primero obedeciendo las leyes «cuánticas» mientras que el segundo obedece las leyes «clásicas». Entre los dos existe un cierto tipo de «corte» conceptual. Este es un punto delicado, porque, ¿dónde hay que situar el «corte»?, una cuestión a la que se optó por suponer, sin pruebas concluyentes, que los resultados netos de la teoría no dependían de manera crítica de donde se situase al corte. Cuando se realiza una medida (o una observación), se produce un «colapso de la función de onda»; esto es, el sistema —no sabemos cómo— elige una situación determinada, expresada por una de las autofunciones mencionadas antes. Lo único que nos dice la mecánica cuántica es la probabilidad de que se produzca una u otra de esas situaciones, una probabilidad asociada a los coeficientes que aparecen en cada uno de los sumandos que forman la función de onda «completa». Hay que resaltar que antes de la medición, el sistema se encuentra en un estado en el que se «superponen» estados cuánticos diferentes.

Como apunté, fue Niels Bohr el campeón de esta interpretación, a la que dedicó muchos esfuerzos, incorporándola a lo que denominó «complementariedad».

Veamos un ejemplo de las muchas páginas que dedicó a explicar sus puntos de vista (Bohr 1958: 310; 1970: 6-7):

Por la palabra «experimento» debemos entender solo un procedimiento respecto al cual podamos comunicar a otras personas lo que hemos hecho y lo que hemos aprendido.

En los montajes experimentales de laboratorio, el cumplimiento de tales condiciones queda asegurado utilizando como instrumentos de medida cuerpos rígidos suficientemente masivos que permitan una descripción clásica de sus posiciones relativas y velocidades. En relación con esto es también esencial recordar que toda información inequívoca referente a objetos atómicos se obtiene a partir de marcas permanentes —tales como una mancha sobre una placa fotográfica, producida por el impacto de un electrón—, dejadas sobre los cuerpos que definen las condiciones experimentales. Lejos de entrañar cualquier complejidad especial, los efectos de amplificación irreversible en los que se basa el registro de la presencia de objetos atómicos nos recuerda más bien la esencial irreversibilidad inherente al propio concepto de observación. La descripción de los fenómenos atómicos tiene a ese respecto un carácter perfectamente objetivo, en el sentido de que no es necesario hacer referencia explícita a ningún observador individual y que, por tanto, con el debido respeto a las exigencias relativistas, no hay ninguna ambigüedad en la comunicación de informaciones.

Por lo que se refiere a estos aspectos, el problema de la observación en física cuántica en nada difiere del tratamiento que le da la física clásica. El único rasgo esencialmente nuevo en el análisis de los fenómenos cuánticos es, sin embargo, la introducción de una distinción fundamental entre el aparato de medida y los objetos investigados, lo que aparece como consecuencia directa de la necesidad de explicar las funciones de los instrumentos de medida en términos puramente clásicos, excluyendo en principio toda consideración respecto al cuanto de acción. Por su parte, los rasgos cuánticos del fenómeno aparecen en la información que se deriva de las observaciones de los objetos atómicos. Mientras que en el campo de la física clásica cabe despreciar la interacción entre objeto y aparato, o en todo caso puede compensarse, en física cuántica ocurre que esta interacción forma parte inseparable del fenómeno. De acuerdo con esto, la explicación inequívoca de los fenómenos cuánticos debe incluir, en principio, una descripción de todos los detalles pertinentes del montaje experimental.

En consecuencia, la teoría cuántica tiene un carácter peculiar, surgido de la interferencia del observador (y sus útiles de medida) con el objeto físico que se investiga. El que el resultado de la observación dependa de la elección de la preparación del experimento (de la situación experimental) entra en conflicto, evidentemente, con el punto de vista de que el Universo «está ahí», independientemente de todos los actos de observación. No es sorprendente, por consiguiente, que la teoría cuántica informada a la manera de la interpretación de Copenhague fuese rechazada por algunos físicos, entre los que destacó Albert Einstein, uno de los fundadores de la física cuántica (me ocuparé de las ideas de Einstein en el capítulo 3).

La mecánica cuántica de Heisenberg y Schrödinger abrió un mundo nuevo, científico al igual que tecnológico, pero en realidad no era sino el primer paso. Existían aún muchos retos pendientes, como, por ejemplo, hacerla compatible con los requisitos de la teoría de la relatividad especial; o construir una teoría del electromagnetismo, una electrodinámica, que incorporase los requisitos cuánticos. Si Einstein había enseñado, y la física cuántica posterior incorporado en su seno, que la luz, una onda electromagnética, estaba cuantizada, esto es, que al mismo tiempo que una onda también era una «corriente» de fotones independientes, y si la electrodinámica que Maxwell había construido en el siglo XIX describía la luz únicamente como una onda, sin ninguna relación con la constante de Planck, entonces era evidente que algo fallaba, que también había que cuantizar el campo electromagnético. Pero salvo eso, se consideraba que el edificio básico de la mecánica cuántica estaba completo. Una muestra de esa optimista visión es lo que Max Born y Werner Heisenberg (2009: 398) decían en las «Conclusiones» de su presentación en el quinto Consejo Solvay que tuvo lugar en 1927, del 24 al 27 de octubre (fue el primero al que asistieron físicos alemanes después de la Primera Guerra Mundial): «A modo de resumen, queremos hacer hincapié en que mientras creemos que [lo que tiene que ver] con un tratamiento mecánico-cuántico del campo electromagnético no está todavía completo, consideramos que la mecánica cuántica es una teoría cerrada, cuyos fundamentos físicos y bases matemáticas no son susceptibles de ninguna modificación».

Con relación a la cuestión que se menciona al final de esta cita, la de las bases matemáticas de la mecánica cuántica, es obligado referirse al libro que el polifacético matemático de origen húngaro John von Neumann, uno de los

gigantes de la ciencia del siglo XX, publicó en 1932: Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik (Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica; Von Neumann (1932). En él quedaron establecidas firmemente las bases matemáticas de la mecánica cuántica. Como explicaba Max Born a Einstein en un carta del 10 de mayo de 1943 (Born 2005:140): «[En Mathematische Grundlagen der Quantemechanik] se encuentra la justificación rigurosa de los conceptos y métodos que Heisenberg, Jordan y yo mismo utilizamos; y en particular la utilización, introducida por mí, de matrices como operadores en un espacio de un número infinito de dimensiones: el «espacio de Hilbert». Yo utilicé para esto resultados debidos a Hilbert, no obstante ser consciente de que las condiciones operacionales impuestas por la física eran más restringidas que las planteadas hasta entonces en el tratamiento matemático de este espacio. Von Neumann logró descubrir demostraciones rigurosas entre las numerosas hipótesis».[28]

Pero el texto de Von Neumann fue más que un tratamiento formal de la mecánica cuántica, al ocuparse de dos temas fundamentales: las variables ocultas y el problema de la medida. El primero tenía que ver con la cuestión de si la ruptura de la causalidad cuántica se podía deber a la existencia de unas «variables ocultas», esto es, no incluidas en la teoría y aún por determinar, que reestablecerían la causalidad. En el mismo artículo que introdujo la interpretación estadística de la función de onda, Born (1926: 836) aludió a esta cuestión en los siguientes términos: «Desde el punto de vista de nuestra mecánica cuántica no existe ninguna cantidad que fije causalmente en un caso individual la consecuencia de la colisión; pero experimentalmente tampoco disponemos hasta el momento de ninguna razón para creer que existan algunas propiedades intrínsecas del átomo que condicionen un resultado definido de la colisión. ¿Debemos esperar descubrir en el futuro algunas propiedades (como fases o movimientos atómicos internos) y determinarlas en casos individuales? ¿O debemos creer que el acuerdo entre teoría y experimento —con respecto a la imposibilidad de prescribir condiciones para una evolución causal— es una armonía preestablecida fundada en la no existencia de tales condiciones? Yo me siento inclinado a abandonar el determinismo en el mundo de los átomos. Pero esta es una cuestión filosófica para la que los argumentos físicos solos no son decisivos». Otros, notablemente Einstein, no se sentían inclinados en la misma dirección.

En Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, von Neumann abordó este problema. Tras un elaborado razonamiento en el que se mezclaban consideraciones de índole matemática con otras de carácter físico, Von Neumann

negaba la posibilidad de una versión causal de la mecánica cuántica. Como explicaba en la «Introducción» (Von Neumann 1932; 1991: 2-3):

Se discute, además, con todo detalle la cuestión de si es posible reducir el carácter estadístico de la mecánica cuántica a un aspecto equívoco, esto es, incompleto, de nuestra descripción de la Naturaleza: esta explicación estaría exactamente de acuerdo con el principio general según el cual todo enunciado probabilístico nace de la no integridad de nuestros conocimientos. Repetidas veces ha sido propuesta esta explicación que recurre a «parámetros ocultos», al igual que otra, afín a ella, que atribuye los «parámetros ocultos» al observador y no al sistema observado. Con todo, se demuestra que difícilmente se puede conseguir esto de modo satisfactorio; más exactamente: una tal explicación es incompatible con ciertos postulados fundamentales de la mecánica cuántica.

Veremos en el capítulo 3 que, sin embargo, aún quedaban cosas por decir sobre estas cuestiones y que el teorema de Von Neumann tenía limitaciones.

Al problema de la medida en la mecánica cuántica, Von Neumann le dedicó dos capítulos de su libro (el V y el VI). Para explicar, sin duda superficialmente, lo que hizo Von Neumann recurriré a lo que escribió otro físico distinguido, David Bohm (1977: 383-385), que dedicó muchos esfuerzos a la interpretación de la mecánica cuántica y, en particular, a la posibilidad de la existencia de variables ocultas:

Von Neumann no solo desarrolló un formalismo nuevo, también desarrolló lo que en ciertos sentidos fue un modo todavía más novedoso de considerar la situación «cuántica» informal (esto es, la forma de las condiciones experimentales y el contexto de los resultados experimentales). Lo que hizo en este sentido fue proponer una separación neta entre objeto observado y aparato observador. Se suponía que el primero obedece las leyes «cuánticas» y que el segundo obedece las leyes «clásicas». Entre los dos existía un cierto tipo de «corte», pero Von Neumann dio argumentos tendentes a sugerir que los resultados netos de la teoría dependían de manera crítica de donde se situase.

Expresado de otra manera, se puede decir que Von Neumann vio con claridad las consecuencias del principio de incertidumbre de Heisenberg y de la interpretación de Copenhague (entonces en construcción), y que en su libro de 1932 presentó con rigor —mayor sin duda que las a menudo confusas presentaciones de Niels Bohr— el problema de la medida en la mecánica cuántica.

LA REVOLUCIÓN (CUÁNTICA) SE EXTIENDE: LA QUÍMICA CUÁNTICA

Habitualmente pensamos en las revoluciones científicas en términos disciplinares; esto es, dentro de una ciencia concreta (o de una parte de ella), cuyos fundamentos y estructura modifica profundamente. Pero las revoluciones no se limitan necesariamente al dominio en el que nacieron. Así, por ejemplo, la Revolución Francesa y la Revolución de Octubre de 1917 repercutieron en la política y aspiraciones de futuro de otras naciones. La física cuántica, la revolución que originó constituye un buen ejemplo en este sentido y, por ello, merece la pena decir algo de ella, para así cerrar el presente capítulo.

El electrón, identificado, como ya se dijo, en 1897 por Joseph John Thomson, director del Laboratorio Cavendish de Cambridge, en experimentos realizados con rayos catódicos, enseguida se convirtió en un territorio común a la física y la química. No sorprendentemente, el propio Thomson fue uno de los primeros en introducirlo en la química con su modelo del pastel de pasas, en el que situaba a los electrones (las «pasas» del pastel) inmersos en una distribución continua de masa cargada positivamente. En particular, intentó explicar la organización de la tabla periódica de los elementos en base al número de electrones que, según él, existían en círculos concéntricos dentro de su modelo atómico. Es oportuno citar unos pasajes del «Prefacio» que abría uno de los libros de Thomson (1923) titulado The Electron in Chemistry, resultado de cinco conferencias que pronunció en el Franklin Institute de Filadelfia:

Ha sido costumbre dividir el estudio de las propiedades de la materia en dos ciencias: física y química. En el pasado esta distinción era real debido a nuestra ignorancia de las estructuras del átomo y la molécula. La región dentro del átomo o de la molécula era un territorio desconocido para la vieja física, que no disponía de ninguna explicación que ofrecer acerca de por qué las propiedades de un elemento diferían de las de otro elemento. Como la química se ocupaba sobre todo de esas diferencias, existía una distinción muy real entre las dos ciencias.

Sin embargo, en el curso del último cuarto de siglo los físicos han penetrado en

ese territorio y han llegado a ideas sobre el átomo y la molécula que indican la manera en que un tipo de átomo difiere de otro y cómo un átomo se une a otros para formar moléculas. Estos son exactamente los problemas de los que se ocupan los químicos, por lo que, si el moderno concepto de átomo es correcto, la barrera que separaba la física de la química habrá sido eliminada.[29]

El siguiente paso en la asociación entre física y química fue ya en la «era cuántica» y se debió a Niels Bohr: se trata de la explicación que dio de la tabla periódica de los elementos, en base a su modelo atómico. Especialmente a partir de 1920, Bohr elaboró varias propuestas acerca de cómo dar cuenta de la tabla periódica de los elementos en base a una serie de números cuánticos que caracterizan las diferentes capas electrónicas. El desarrollo de la física cuántica se entrelazaba de esta manera con un apartado fundamental de la química, el de la ordenación de los elementos.

El paso fundamental en el camino hacia una comprensión, basada en el electrón, del enlace químico, un elemento fundamental en toda teoría química, tuvo como protagonistas al estadounidense Gilbert Newton Lewis y al alemán Walther Kossel, que en 1916 publicaron dos artículos (el de Lewis [1916] en el Journal of the American Chemical Society, y el de Kossel [1916] en el Annalen der Physik). Ambos tuvieron un gran impacto en la comunidad química. Lo esencial de sus respectivos trabajos es que identificaron dos tipos de fuerzas que daban origen a la unión de elementos químicos: una (heteropolar o polar) debida a la atracción electrostática entre átomos ionizados, y otra (homopolar o no polar, que no había imaginado Berzelius en su teoría dualista basada en la electrolisis) que se producía debido a desequilibrios eléctricos que tenían lugar en dos átomos neutros.

En 1916, Lewis y Kossel manejaban la idea de «estabilidad electrónica» de la siguiente manera: suponían que los grupos de electrones alcanzaban el mayor grado de simetría y estabilidad en los átomos de los gases raros; el helio con su grupo de 2 electrones, el neón con grupos de 2 y 8, el argón con dos grupos de 8, y así sucesivamente. En cuanto a los átomos de los restantes elementos, tenían, suponían, una fuerte tendencia bien a expulsar o a captar electrones de tal manera que adoptasen la estructura del gas noble más cercano a él en la tabla periódica.

En resumen, lo que Lewis y Kossel sostenían es que el enlace químico se puede producir de dos maneras: bien mediante la transferencia de electrones (electrovalencia) o compartiendo electrones (covalencia), aunque también se podrían dar casos intermedios. Como se terminó comprobando, la electrovalencia predomina en la química inorgánica, mientras que la covalencia domina en la química orgánica.

Un punto importante es que los modelos atómicos que manejaban Lewis y Kossel no eran idénticos. Mientras que el científico alemán suponía que los grupos de electrones se situaban en anillos concéntricos entorno al núcleo atómico, a la manera del átomo de Rutherford-Bohr, el estadounidense imaginaba que esos grupos constituían una estructura tridimensional, que representaba mediante un cubo en cuyos vértices situaba a 8 electrones. En otras palabras: aunque Lewis conocía el átomo de Bohr, no parecía estar muy seguro de que fuese correcto.

Fueron las ideas de Lewis las que más influencia ejercieron, especialmente después de que publicase un libro que se convertiría en un clásico: Valence and the Structure of Atoms and Molecules (Lewis 1923). Aunque ya antes (1916-1919) un compatriota de Lewis, Irving Langmuir, que trabajaba en laboratorios industriales y que había estudiado en Alemania con Walther Nernst, realizó notables aportaciones en la «reelaboración», o popularización, del nuevo tipo de enlace. De hecho, fue Langmuir quien introdujo, en un artículo («La disposición de los electrones en átomos y moléculas») publicado en 1919 en el Journal of the American Chemical Society), los nombres «covalente» y «electrocovalente» (Langmuir, 1919; Suits y Way, eds. 1961: 65). En la sección titulada «Valencia, número de coordinación y covalencia» escribía: «Para distinguir entre la valencia que hemos encontrado así y la que se da en la teoría de la valencia ordinaria, denotaremos con el término «covalencia» el número de pares de electrones que un átomo comparte con su vecino».

Langmuir es interesante no solo por sus contribuciones, que fueron numerosas e importantes (recibió el Premio Nobel de Química en 1932), sino porque es un ejemplo de científico al que el desarrollo de la física cuántica le llegó a una edad lo suficientemente joven como para que se sumase a ese nuevo mundo científico (en una presentación más completa, habría que señalar que desarrolló la mayor parte de su carrera en un laboratorio industrial). Advirtió con claridad lo que la física cuántica podía significar para la química. Ejemplo en este sentido es lo que escribió en un artículo publicado en 1921, titulado «Futuros desarrollos de la

química teórica». En él, después de tratar del átomo de Rutherford y Bohr, y de mencionar las aportaciones de William H. y William L. Bragg, Van den Broek y Moseley, señalaba (Langmuir, 1921; Suits y Way, 1962: 243):

Y todas estas cosas marcan el comienzo, creo, de una nueva química, una química deductiva, una en la que podemos obtener relaciones sin recurrir a intuiciones. La ciencia química del pasado ha sido en cierto modo parecida a la biología, botánica, geología y disciplinas parecidas, en las que no podemos expresar los resultados cuantitativamente. Disponíamos, por supuesto, de algunas leyes cuantitativas; leyes, por ejemplo, termodinámicas, o leyes de combinaciones de proporciones múltiples. Pero aunque estas leyes han tenido una gran importancia, han sido capaces de explicar solamente una proporción insignificante de los fenómenos químicos.

Si miramos hacia el futuro, ¿cuáles serán los desarrollos más probables en la química puramente teórica durante los próximos años? Creo que en el campo de la estructura atómica dominará la química teórica, porque un conocimiento de la estructura atómica nos permitirá deducir las propiedades químicas y físicas de átomos y moléculas.

Y pronto, muy pronto, esa física atómica iba a contar con instrumentos más poderosos, con una mecánica cuántica. En principio, parecía que ya solo quedaba resolver la ecuación de Schrödinger para el sistema formado por los átomos que constituían una molécula para resolver así todos los problemas asociados a esta, incluyendo, claro está, la cuestión del enlace. Dirac expresó tal convicción en un artículo que publicó en 1929 en los siguientes términos (Dirac, 1929: 714): «La teoría general de la mecánica cuántica está ahora casi completa, las imperfecciones que todavía existen tienen que ver con el encaje exacto de la teoría con las ideas relativistas [...] Por consiguiente, las leyes físicas subyacentes en la teoría matemática de una gran parte de la física y de toda la química se conocen completamente, y la dificultad únicamente se encuentra en que la aplicación exacta de estas leyes conduce a ecuaciones demasiado complicadas para ser resueltas».

Pronto, efectivamente, quedó claro que la ecuación de Schrödinger únicamente

se puede resolver en los casos más sencillos, que para los demás es demasiado compleja. En consecuencia, de entrada parecía que iba a resultar de poca ayuda para los químicos. Pero no fue así, especialmente en lo que se refiere al enlace químico. De hecho, la naturaleza del enlace químico fue uno de los primeros problemas en ser abordados con la nueva mecánica cuántica ondulatoria.

El origen de la especialidad que vendría en denominarse «química cuántica», se asocia generalmente a la publicación, en 1927, de un artículo de Walter Heitler y Fritz London en el que explicaron la estabilidad de la molécula de hidrógeno dentro de la recientemente formulada mecánica cuántica. Se titulaba «Interacción entre átomos neutros y el enlace homopolar de acuerdo a la mecánica cuántica» (Heitler y London 1927). Más concretamente, lo que hicieron fue estudiar la interacción entre dos átomos de hidrógeno, con el resultado de que obtenían el enlace químico como resultado de una «resonancia» mecánico-cuántica, un concepto este, el de resonancia, que había sido introducido en la mecánica cuántica el año anterior por Heisenberg, con relación a los estados cuánticos del átomo de helio (Heisenberg 1926).

Importante fue también el principio de exclusión que Wolfgang Pauli había introducido en 1925, según el cual dos electrones eran indistinguibles. Es interesante señalar que esta colaboración entre Heitler y London tuvo lugar en Zúrich, en el Instituto de Física de la Universidad, que dirigía entonces Schrödinger, quien, como se reconocía en el artículo, había ayudado a los autores. Con anterioridad a Zúrich, a partir de octubre de 1925 London había sido ayudante de Peter Debye, que dirigía el Instituto de Física Teórica de la Technische Hoschschule de Stuttgart; fue allí donde comenzó a trabajar en la mecánica cuántica. Por su parte, Heitler se había doctorado en Múnich bajo la dirección de Karl Herzberg con un tema de química (soluciones concentradas). El establecimiento de la mecánica cuántica (que inicialmente no estudió de manera sistemática) coincidió con el periodo en el que trabajaba en su tesis. Una vez completada su tesis, Arnold Sommerfeld logró que la International Education Board de la Fundación Rockefeller le concediera una beca para trabajar con Niels Bjerrum en Copenhague en un problema de iones en soluciones. Fue en Copenhague, el «cuartel general» de Bohr, donde Heitler decidió dirigir su investigación a la mecánica cuántica, convenciendo a Bjerrum, a la International Education Board y a Schrödinger para que le dejasen pasar la segunda parte de su beca en Zúrich.

El mismo año que se publicó el artículo de Heitler y London, apareció otro

artículo que también contribuyó de manera destacada al establecimiento de la química cuántica. Su autor era Friedrich Hund, cuyo enfoque se basaba en suponer que cada electrón se mueve en el campo producido por todos los demás átomos y electrones presentes en la molécula (Hund, 1926; Hund, 1927). A su método se le conoce como «orbital molecular», mientras que al de Heitler y London se le denomina «orbital atómico».

Junto a Heitler, London y Hund, hay que mencionar a Max Born, Robert Oppenheimer, Robert Mulliken, John Lennard-Jones, Douglas R. Hartree y Vladimir Fock.[30] Las aportaciones de estos científicos despejaron el camino para los trabajos de Linus Pauling (1901-1994), «el Einstein de la química», como se le ha llegado a llamar. Según Pauling la «química es un fenómeno cuántico, o, mejor, una gran colección de fenómenos cuánticos».[31]

Con Linus Pauling nos encontramos ante uno de los grandes científicos del siglo XX, uno que reunió dos Premios Nobel, el de Química en 1954 y el de la Paz en 1962. Nacido en Portland (Estados Unidos) en 1901, esto es, justo cuando comenzaba el siglo XX, Pauling estudió en el Oregon Agricultural College (ahora Oregon State University) entre 1917 y 1922, año en el que se trasladó a California, al California Institute of Technology, con el propósito de doctorarse, lo que consiguió en 1925 con una tesis titulada The Determination with X-rays of the Structure of Crystals. Por entonces hacía tiempo que se interesaba por la naturaleza del enlace químico. Cómo llegó a este interés es algo que explicó en un manuscrito publicado bastantes años después de ser escrito (Pauling, 2001; Mead y Hager, eds., 2001: 109):

Durante mis primeros años como científico, comenzando en 1919, tuve un interés especial en el problema de la naturaleza del enlace químico, esto es, en la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidos a los átomos en moléculas, cristales y otras sustancias. Una buena parte de mis trabajos durante aquel primer periodo se dirigió a resolver este problema, aplicando métodos tanto experimentales como teóricos. Tan pronto como se descubrió la mecánica cuántica, en 1925, comencé a intentar aplicar esta poderosa teoría al problema.

Una vez completado su doctorado, Pauling consiguió una beca de la John Simon

Guggenheim Memorial Foundation para ampliar estudios en Europa. Su propósito era pasar un año en Múnich junto a Sommerfeld, y aprovechar también para visitar a Niels Bohr en Copenhague, a Max Born en Gotinga y a los Bragg en Manchester. Llegó a Múnich en abril de 1926. Coincidió con que Sommerfeld estaba desarrollando un curso sobre la reciente mecánica ondulatoria de Schrödinger, curso que Pauling siguió. También mientras estaba en Múnich, Gregor Wentzel, que se había doctorado con Sommerfeld y que en aquel momento era privatdozent, estaba utilizando el espín y la nueva mecánica cuántica para estudiar átomos complejos. En ese ambiente, Pauling se convenció de que la mecánica cuántica era necesaria para resolver problemas químicos. A Noyes, que le había ayudado para conseguir la beca Guggenheim, le escribía el 12 de julio de 1926 (Gavroglu y Simões 2012: 57): «Ahora estoy trabajando en la nueva mecánica cuántica, ya que pienso que la química atómica y molecular lo requerirá. Espero aprender algo sobre la distribución de las órbitas electrónicas en átomos y moléculas».

Después de pasar un año con Sommerfeld, estuvo un mes con Bohr en Copenhague, y hasta el otoño de 1928, cuando regresó a América, el resto del tiempo lo pasó en Zúrich, con Schrödinger. Especialmente importante fue que en Múnich conoció a Walter Heitler y Fritz London. «Inmediatamente», escribió años más tarde Pauling, «comencé a aplicar la teoría de Heitler y London a sistemas más complicados, y en 1928 publiqué un breve artículo sobre la teoría del par de electrones compartidos en el enlace químico [...] En 1931, estimulado en parte por el trabajo de John Slater [...] publiqué una descripción detallada de la mecánica cuántica del enlace covalente» (Pauling, 1981: 208-209).

Junto a Pauling, el físico John Slater fue uno de los que más contribuyeron al establecimiento de la química cuántica como disciplina. En su caso se ve con gran claridad la relación entre física del estado sólido y química cuántica. En este sentido, el historiador Silvan Schweber (1990: 379) ha señalado que «Slater nunca consideró la estructura molecular y la física del estado sólido como dos campos separados». Que así era se puede ver en la carta que el propio Slater envió a Percy W. Bridgman el 22 de julio de 1929 (Schweber 1990: 379): «[La mayoría de los físicos] se dedican a estudiar los metales desde el lado equivocado, esto es, intentando inventar teorías para explicar rasgos bastante concretos, en lugar de ver el problema en su conjunto. Este verano voy a tratar de avanzar en la dirección opuesta. Recordará que quiero desarrollar métodos generales para resolver problemas en sólidos. Creo que la mejor forma de empezar es tomar un problema y dedicarse a él, y he decidido ir hacia el más

obvio: las fuerzas de cohesión en metales, con la compresibilidad, estructura cristalina y todo lo que lleva asociado [...] Lo primero que intentaré hacer es averiguar experimentalmente lo más que pueda acerca de las fuerzas, a partir del calor de disociación, compresibilidad, etc., tratando de ver cuánto se solapan los átomos en el cristal, si existe alguna relación entre solapamiento y conductividad».

Las iniciativas y liderazgo de Pauling y Slater ayudaron a que la química cuántica floreciese en Norteamérica más que en otros lugares, pero no se puede explicar ese florecimiento únicamente en base a dos personas, no importa lo capaces que fueran, y realmente lo fueron. La creación de la mecánica cuántica coincidió con un momento en el que las ciencias físico-químicas estaban alcanzando en Estados Unidos su mayoría de edad. Y las nuevas ideas atrajeron a los recién llegados a la física, a los jóvenes, confirmando en este caso esta máxima casi universalmente aceptada. Además de los ya citados, también John Van Vleck, Harold Urey, Edward Condon, David Dennison, Ralph Kroning, Isidor I. Rabi, Clarence Zener, Philip M. Morse, Henry Eyring, John G. Kirkwood, George E. Kimball, E. Bright Wilson, Oscar Rice o Joseph Hirschfelder, que en un momento u otro realizaron aportaciones a la química cuántica.

Pero regresemos a Pauling. Todavía en Europa, comenzó a publicar trabajos sobre química cuántica, como el artículo que apareció en 1927 en los Proceedings of the Royal Society sobre las propiedades de átomos con muchos electrones e iones. De regreso a Estados Unidos y a Caltech, se centró sobre todo en el uso de la difracción de rayos X para el estudio de cristales y en cálculos mecánico-cuánticos sobre átomos y moléculas, dominio en el que el enlace químico desempeñaba un lugar central. Sus trabajos sobre la naturaleza del enlace químico los condensó luego en su gran libro, The Nature of the Chemical Bond (Pauling, 1939), dedicado, por cierto, a Gilbert Newton Lewis. En el prefacio de este libro, explicaba cómo había llegado a escribirlo y cuál era en su opinión su importancia. En él decía (Pauling, 1940: x):

Durante mucho tiempo he estado planeando escribir un libro sobre la estructura de moléculas y cristales y la naturaleza del enlace químico. Con el desarrollo de la mecánica cuántica y su aplicación a problemas químicos se hizo evidente que tendría que tomar una decisión acerca de hasta qué punto se debería incorporar

los métodos matemáticos de la teoría en este libro. Llegué a la conclusión de que, incluso aunque muchos de los recientes progresos de la química estructural se habían debido a la mecánica cuántica, debería ser posible describir los nuevos desarrollos de una forma directa y satisfactoria sin recurrir a matemáticas avanzadas. Solamente una pequeña parte del cuerpo de las contribuciones de la mecánica cuántica a la química ha sido de carácter mecánico-cuántico; por ejemplo, únicamente en unos pocos casos se han obtenido resultados de interés químico directo mediante la solución exacta de la ecuación de ondas de Schrödinger [...] La principal contribución de la mecánica cuántica a la química ha sido sugerir nuevas ideas, tales como la resonancia de moléculas entre varias estructuras electrónicas con el consiguiente aumento de estabilidad.

La química cuántica contó a partir de entonces con un libro canónico de texto, uno de esos que, como señalaba Kuhn, sirve para configurar una disciplina.

PAUL A. M. DIRAC: FÍSICA, MATEMÁTICAS Y «BELLEZA»

Paul Adrian Maurice Dirac, el físico con el que nos encontramos cuando traté de la mecánica cuántica, de la que fue uno de sus fundadores, fue un personaje extremadamente interesante. Interesante, a la vez que peculiar. Son multitud las anécdotas que se cuentan sobre este físico silencioso y exacto; como aquella según la cual, tras una conferencia, uno de los asistentes se levantó y dijo: «Profesor Dirac, no he entendido la ecuación que ha escrito, allí en la derecha (digamos) de la pizarra». Silencio. Y como Dirac continuaba sin decir una palabra, el moderador se atreve a decir: «Profesor Dirac, ¿no va a contestar a esa pregunta?». A lo que Dirac responde: «No ha sido una pregunta. Ha sido una declaración».[32]

La formulación «algebraica» de la mecánica cuántica, que he citado anteriormente, debió mucho al hecho ya señalado de que Dirac tuviese acceso a las pruebas del artículo en el que Heisenberg presentó su mecánica cuántica matricial. En un artículo en el que Dirac recordaba su reacción cuando lo leyó, escribió (Dirac 1977: 121-122):

Me di cuenta enseguida de que la no conmutación era realmente el rasgo más importante de la nueva teoría. Lo que preocupaba tanto a Heisenberg era, en realidad, el principal nuevo rasgo de la teoría y lo que uno debía entender. Por supuesto, para tratar de entender esto yo disponía de la forma hamiltoniana de la dinámica, que conocía.

Fue durante uno de mis paseos dominicales, en octubre de 1925, mientras estaba pensando detenidamente, a pesar de mi intención de relajarme, en ese u·w-w·u, cuando me vinieron a la mente los corchetes de Poisson. Recordé algo que había leído antes acerca de estas extrañas cantidades en uno de los libros avanzados de dinámica y, de lo que podía recordar, existía una estrecha similitud entre un corchete de Poisson de dos cantidades, u y w, y el conmutador u·w-w·u.

Dirac no estaba seguro de que en realidad existiese tal analogía, ni tampoco

recordaba bien «lo que eran los corchetes de Poisson», así que tuvo que esperar a que el lunes abriese la biblioteca, puesto que no encontró nada en sus apuntes. Y cuando pudo entrar en la biblioteca de la Universidad de Cambridge, fue a buscar en un texto clásico de mecánica analítica: A Treatise on the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies, de Edmund Whittaker, catedrático de Matemáticas en la Universidad de Edimburgo. Y allí encontró una sección, la número 130, titulada «Poisson's bracket-expressions» (Whittaker 1937: 299). [33] «La idea de conectar los corchetes de Poisson con los conmutadores», señaló Dirac (1977: 123), «constituyó el comienzo de mi trabajo en la nueva mecánica cuántica».

Independientemente del interés de las anteriores manifestaciones, estas aportan luz a un apartado que no se debe olvidar: el papel que desempeñó un cierto «sentido estético matemático» en los trabajos de Dirac. Ahora bien, ¿qué quiere decir «sentido estético matemático»? Existen varios textos en los que Dirac trató de explicarlo. Uno de ellos es un artículo publicado en 1939 bajo el significativo título «La relación entre matemáticas y física». Se lee en él (Dirac 193: 122-123):

En su estudio de los fenómenos naturales, el físico tiene dos métodos para progresar: (1) el método del experimento y la observación, y (2) el método del razonamiento matemático. El primero es simplemente recoger datos seleccionados; el segundo le permite a uno inferir resultados sobre experimentos que no se han realizado. No existe ninguna razón por la que el segundo método deba ser posible, pero en la práctica hemos encontrado que funciona y que lo hace con notable éxito. Esto debe adjudicarse a alguna cualidad matemática de la Naturaleza, una cualidad que el observador ocasional de la Naturaleza no sospecharía, pero que sin embargo desempeña un papel importante en el esquema de la Naturaleza [...]

La idea dominante en esta aplicación de la matemática a la física es que las ecuaciones que representan las leyes del movimiento deberían tener una forma simple. Todo el éxito de este esquema se debe al hecho de que parece que las ecuaciones de forma simple funcionan. En consecuencia, el físico dispone del principio de simplicidad, que puede utilizar como instrumento de investigación.

Sin embargo, continuaba Dirac, «el descubrimiento de la teoría de la relatividad hizo necesario modificar el principio de simplicidad [...] Lo que hace tan aceptable la teoría de la relatividad a los físicos, a pesar de ir en contra del principio de simplicidad, es su gran belleza matemática. Esta es una cualidad que no se puede definir, no más que se puede definir la belleza en el arte, pero que las personas que estudian matemáticas no tienen normalmente dificultad en reconocer». Y después de explicar las formas en que la teoría de la relatividad introduce esa «belleza matemática», afirmaba (Dirac 1939: 123-124): «Vemos ahora que debemos cambiar el principio de simplicidad por un principio de belleza matemática. En sus esfuerzos por expresar las leyes fundamentales de la Naturaleza en forma matemática, el investigador debería perseguir sobre todo la belleza matemática».

Y no solo era en la relatividad donde Dirac encontraba y justificaba ese principio de belleza: también lo hacía en la física cuántica. «Existe», escribió, «una extrema analogía formal entre la mecánica cuántica y la vieja mecánica. De hecho, es sorprendente cuán adaptable es la vieja mecánica a la generalización del álgebra no conmutativa [a la que está sujeta la mecánica cuántica]. Todos los elegantes rasgos de la vieja mecánica se pueden llevar a la nueva mecánica, donde reaparece con una belleza reforzada [...] La matemática pura y la física están acercándose más de lo que nunca lo habían hecho, aunque sus métodos continúan siendo diferentes. Se puede describir la situación diciendo que el matemático realiza un juego en el que él mismo inventa las reglas, mientras que las reglas del juego en el que participa el físico las suministra la Naturaleza. Pero según transcurre el tiempo, se hace cada vez más evidente que las reglas que el matemático encuentra interesantes son las mismas que ha escogido la Naturaleza. Es difícil predecir cuál será el resultado de todo esto. Posiblemente, los dos modos se unificarán en última instancia, toda rama de la matemática pura tendrá entonces su aplicación física, siendo su importancia en la física proporcional a su interés en la matemática.»

Se trataba de ideas extremadamente radicales, que pocos físicos compartían (como veremos en el próximo capítulo, Einstein terminó acercándose mucho a ellas). Pero a Dirac le funcionaron, no solo en su formulación de 1925 de la mecánica cuántica, sino, con claridad, en al menos una ocasión más, cuando desarrolló su teoría relativista del electrón (Dirac 1928 a, b), a la que me referiré enseguida.

Un libro de Dirac en el que se puede apreciar el sentido estético, al igual que la

precisión, que caracterizó la obra de este físico británico, es The Principles of Quantum Mechanics. Publicado en 1930 por Clarendon Press, Oxford, se convirtió en un libro de texto para muchos de los que deseaban aprender la nueva mecánica. Consistente con ello, Dirac lo fue actualizando, publicándose cinco ediciones (1930, 1935, 1947, 1958, 1967), más numerosas reimpresiones. [34] En el ámbito de la física cuántica proporciona un ejemplo de esos libros que, según Thomas Kuhn, configuran una revolución científica. «La Física de Aristóteles, el Almagesto de Ptolomeo, los Principia y la Óptica de Newton, la Electricidad de Franklin, la Química de Lavoisier y la Geología de Lyell», se lee en The Structure of Scientific Revolutions (Kuhn 1971: 33), «estas y muchas otras obras sirvieron implícitamente, durante cierto tiempo, para definir los problemas y métodos legítimos de un campo de investigación para generaciones sucesivas de científicos». Lo mismo se puede escribir de The Principles of Quantum Mechanics, aunque surgieran otras obras (ninguna de los «padres fundadores de la teoría») que compitieron con él a la hora de servir como libro de texto. En palabras de Abdus Salam y Eugene Wigner (1972: ix; Brown 2006: 381): «La posteridad calificará a Dirac como uno de los grandes físicos de todos los tiempos. La presente generación lo valora como uno de sus grandes maestros; enseñanzas que llegaron tanto a través de sus lúcidas conferencias como de su libro, The Principles of Quantum Mechanics. Este texto exhibe una claridad y espíritu similar al de los Principia que escribió su predecesor en la Cátedra Lucasiana de Cambridge». De forma más concreta, el distinguido físico y matemático de origen indio Harish-Chandra (1987: 34; Brown 1982: 381-382) manifestó: «En 1940, siendo un joven estudiante no graduado, me encontré con un ejemplar del libro de Dirac [...] —la primera edición de 1930— en la biblioteca de la Universidad Allahabad de la India, que me fascinó enseguida. La exposición era tan lúcida y elegante que me dio la impresión de haber entendido la mayor parte de su contenido y produjo en mí el fuerte deseo de dedicar mi vida a la física teórica».[35] Sería interesante estudiar, a la luz de las modificaciones que fue introduciendo Dirac en las sucesivas ediciones, cómo pudieron influir sus contenidos en la dirección que tomaron las investigaciones en la física cuántica.[36]

REVOLUCIONES DENTRO DE UNA REVOLUCIÓN: LA ECUACIÓN DE DIRAC Y LA ANTIMATERIA

La teoría relativista del electrón, o «ecuación de Dirac», no forma parte de lo que podríamos denominar el «núcleo duro» de la revolución cuántica; sin embargo, su contenido condujo a resultados revolucionarios: la existencia de antimateria, partículas con la misma masa, pero otras propiedades elementales (como la carga eléctrica) de signo opuesto. Semejante hecho muestra que las revoluciones, algunas al menos, constituyen el germen de otras revoluciones, más pequeñas, menos «fundamentales», si se quiere, pero revoluciones al fin y al cabo. La revolución cuántica generó esas «revoluciones derivadas» más pronto y más abundantemente que la revolución relativista, que, como veremos en el siguiente capítulo, no mostró su potencial revolucionario subsidiario hasta la segunda mitad del siglo XX.

La ecuación de Dirac surgió de algo inevitable: del intento de unificar, de hacer compatibles, las dos revoluciones (relativista y cuántica) que habían cambiado la física. A pesar del avance que significaba, la mecánica cuántica de Heisenberg-Schrödinger-Dirac no era relativista (no cumplía los requisitos de la relatividad especial; la relatividad general, recordemos, no introduce requisitos universales, es solo una teoría de la interacción gravitacional); esto es, no era invariante bajo las transformaciones de Lorentz.[37] De hecho, Dirac no fue el primero que abordó este problema. Antes de obtener la ecuación que le hizo famoso y que sirvió de base a la mecánica cuántica ondulatoria, Schrödinger obtuvo una ecuación de onda relativista que, sin embargo, no publicó porque se dio cuenta de que de ella no se deducía con la precisión suficiente el espectro del hidrógeno.[38] Independientemente de Schrödinger, y después de que él hubiese obtenido su ecuación de onda no relativista, otros físicos —entre ellos Vladimir Fock, Walter Gordon, Johann Kudar y Louis de Broglie— trataron de desarrollar ecuaciones relativistas, siendo Oskar Klein (1926) el primero en publicar una. La ecuación a la que llegó es conocida como «ecuación de Klein-Gordon» (Gordon 1926). Pero esta teoría no satisfacía a Dirac, como explicó posteriormente (Dirac 1991: 184): «Tal y como se concebía entonces la relatividad, todas las teorías relativistas tenían que poder expresarse en forma tensorial. Sobre esta base no se podía mejorar la teoría de Klein y Gordon. La mayor parte de los físicos se contentaban con la teoría de Klein y Gordon, a la que consideraban como la

mejor teoría cuántica relativista posible para un electrón, pero yo estaba siempre insatisfecho por la discrepancia que había entre esa teoría y los principios generales, de manera que no dejé de reflexionar hasta que encontré una solución».

Ante el estupor de sus colegas, que no entendían su insatisfacción ante la ecuación de Klein-Gordon, en solitario, sin intercambiar ideas o preguntas con otros físicos (su método de trabajo habitual), Dirac se dedicó, en el otoño de 1927, a buscar una teoría relativista y cuántica que satisficiese para el caso de una partícula tan básica como el electrón, sus expectativas. «Fue», explicó años más tarde (Dirac 1977: 142), «un problema duro durante algunos meses, y la solución llegó, diríamos, como llovida del cielo, uno de mis éxitos inmerecidos. Llegó jugando con las matemáticas». Y añadía: «Estaba jugando con las tres componentes σ1, σ2, σ3, que había utilizado para describir el espín de un electrón y me di cuenta de que si uno formaba la expresión $\sigma1 \cdot p1 + \sigma2 \cdot p2 + \sigma3 \cdot p3$, donde p1, p2 y p3 son las tres componentes del momento, y hallaba su cuadrado, se obtenía $p1^2 + p2^2 + p3^2$, esto es, el cuadrado del momento [del electrón]. Esto constituía un resultado matemático muy bonito. Me excitó bastante. Parecía que debía ser importante. Pero no respondía inmediatamente a la cuestión de cómo se podría obtener una ecuación relativista del electrón».[39]

No resolvía el problema, pero sí daba pistas para hacerlo. Una de esas pistas fue ampliar las tres componentes σ1, σ2, σ3, que, siguiendo a Pauli, eran matrices 2 × 2 (dos filas y dos columnas), por matrices 4 × 4. Esto, y los «principios generales» a los que había aludido antes.

La nueva ecuación que obtuvo Dirac tenía una serie de propiedades interesantes a la vez que sorprendentes. Por una parte, al introducir esas matrices resultaba que la función de onda tenía 4 componentes en lugar de 2, como en intentos anteriores de Pauli. Dos componentes podían interpretarse como correspondientes a dos estados de energía positiva, cada uno con una orientación del espín (esto es, ½ y -½), lo que significaba que el espín del electrón surgía de manera «natural» de la ecuación relativista. El problema eran los otros dos estados, que correspondían a energías negativas, algo imposible según las ideas imperantes hasta entonces en la física. De hecho, Dirac optó por ignorar estos dos estados: «se deben rechazar dos de las soluciones, al referirse a la carga +e del electrón», escribía (Dirac 1928 a: 618). Dirac se contentó —y no era poco— con la «predicción» del espín, y con el hecho de que de la ecuación se dedujesen otros resultados muy valiosos para la física cuántica: se obtenían los valores

correctos para la estructura fina del espectro del hidrógeno, el efecto Zeeman anómalo y el coeficiente giromagnético, g=2, para el electrón.

Sin embargo, la potencia de estas predicciones no evitaba que este nuevo trabajo de Dirac resultase «duro de roer» a muchos físicos, entre ellos a una de las futuras estrellas de la física, Hans Bethe (uno de los miembros de la gran escuela de Arnold Sommerfeld) quien desde Múnich escribía el 4 de mayo de 1928 a Rudolf Peierls (Lee 2007: 33-34): «He intentado leer el trabajo de Dirac, que se publicó en el número de febrero o marzo de la revista Proc. Roy. Soc. Después de varios días he comenzado a tener alguna idea de lo que trata, pero no he comprendido una sola palabra. Con respecto a los cálculos, como mucho he entendido el 25% de las operaciones matriciales. El por qué se hacen, no lo comprendo en absoluto, pero imagino que demuestran que el artículo es muy bueno». Parecida reacción suscitó la ecuación de Dirac en otro joven físico, que pronto comenzaría a realizar aportaciones destacadas a la física cuántica, Victor Weisskopf (1983: 63), por entonces estudiante de doctorado en la Universidad de Gotinga, donde el líder teórico era Max Born: «Para nosotros, la ecuación de Dirac constituía un gran rompecabezas, y teníamos dificultad para entender su significado [...] Nos resultaba mucho más misteriosa que la teoría de las transformaciones de Dirac y que su teoría de radiación. Imagine a un estudiante que acaba de pasar por los problemas conceptuales de la mecánica cuántica ordinaria y que comienza a sentirse no solo incómodo sino apenas capaz de tratar con las funciones de onda de Schrödinger y las matrices que no conmutan de Heisenberg y que, de repente, se encuentra con funciones de onda de cuatro componentes y con extrañas propiedades de transformación de las que nunca había oído hablar antes. Desanimaba bastante».

Por lo que respecta al problema de la energía negativa, no se produjo ningún avance durante los dos siguientes años. Pero en 1930 Dirac ya tenía otras ideas al respecto: supuso que «todos los estados de energía negativa están ocupados, excepto acaso unos pocos de pequeña velocidad. Todos los electrones de energía positiva tendrán una probabilidad muy pequeña de saltar a estados de energía negativa y, por tanto, se comportarán como los electrones que se observan en el laboratorio. Tendremos un número infinito de electrones en estados de energía negativa, y de hecho existirá un número infinito de ellos en el mundo por unidad de volumen, pero si su distribución es perfectamente uniforme deberíamos esperar que fuesen completamente inobservables. Solamente podríamos esperar poder observar pequeñas desviaciones de la perfecta uniformidad, si algunos de los estados de energía negativa quedasen sin ocupar» (Dirac 1930: 362).

Opinaba que esos estados sin ocupar, o «huecos», debían ser protones: «nos vemos conducidos por consiguiente a la conclusión de que los huecos en la distribución de electrones de energía negativa son los protones» (Dirac 1930: 363). De esta forma, su ecuación de 1928 explicaría las dos partículas elementales conocidas entonces, electrón y protón. Existían, sin embargo, sólidos argumentos teóricos que impedían defender que los huecos en el mar de energía negativa pudiesen asimilarse a protones: como señaló Hermann Weyl en la segunda edición de su libro Gruppentheorie und Quantenmechanik (Weyl 1931; 1950: 263), por razones de simetría deberían tener la misma masa que los electrones, pero los protones son mucho más pesados. Este hecho (y otros) llevó a Dirac a proponer otra idea, aunque lo hizo de pasada en un artículo que publicó en 1931: «Parece por tanto que debemos abandonar la identificación de los huecos con protones y debemos encontrar otra interpretación para ellos [...] Un hueco, si existiese uno, sería un nuevo tipo de partícula, desconocida para la física experimental, que tiene la misma masa pero carga opuesta al electrón. Podríamos llamar a esta partícula un anti-electrón» (Dirac 1931: 61). Nótese que con esta interpretación del hueco, el «vacío» dejaba de estar vacío al contener un número infinito de electrones.

No pasó demasiado tiempo hasta que se descubriese experimentalmente esa nueva partícula (a la que se dio el nombre de positrón): en 1931, el físico estadounidense Carl Anderson (1905-1991), utilizando una cámara de niebla, obtenía las primeras fotografías de los misteriosos rayos cósmicos que habían sido observados por primera vez en 1911 por el físico austriaco Victor Hess, quien publicó sus resultados un año más tarde (Hess 1912).[40] Anderson advirtió que en sus fotografías aparecían, con frecuencia parecida, trazas que debían corresponder a partículas de carga opuesta; pero pensó, junto a Robert Millikan (su jefe en el California Institute of Technology, y un hombre con ideas muy particulares sobre la naturaleza de la radiación cósmica), que las partículas de carga positiva serían protones. Sin embargo, estudios más detallados (medidas de la ionización y de la curvatura de las trazas) mostraron que al menos algunas de las trazas dejadas por las partículas no podían deberse a protones. Finalmente, Anderson publicó un breve artículo en el número del 9 de septiembre de 1932 de la revista Science, órgano de la American Association for the Advancement of Science. Se titulaba «La aparente existencia de positivos que se pueden desviar fácilmente», un ambiguo y bastante oscuro título que revela las reservas que, a pesar de todo, albergaba. Aun así, escribía (Anderson 1932: 239):

Para la interpretación de estos efectos [las trazas de las fotografías que había tomado] parece necesario recurrir a partículas cargadas positivamente que tengan una masa comparable a la del electrón, o bien admitir la aparición casual en la misma fotografía de trazas independientes situadas de tal manera que indican un punto común de origen de dos partículas. Esta última posibilidad es muy improbable en base estadística.

La interpretación de estas trazas como debidas a protones u otros núcleos pesados, se excluye en base al rango [longitud de las trazas] y curvatura. Protones o núcleos pesados con las curvaturas observadas no podrían tener rangos tan grandes como los que se observan. La ionización específica está próxima a la de un electrón de la misma curvatura, lo que indica una partícula con carga positiva comparable en masa y magnitud de la carga a un electrón.

Unos meses después, el 28 de febrero de 1933, aparecía un nuevo artículo suyo titulado «El electrón positivo» (Anderson 1933), aunque en él ya utilizó el nombre positrón. Las dudas de su nota de Science —motivadas, señalaba (Anderson 1933: 491), «por la importancia y sorprendente naturaleza del anuncio»— ya habían desaparecido.

El descubrimiento de Anderson fue accidental, en el sentido de que no fue motivado por los trabajos de Dirac: fue producto de lo que podríamos denominar «comienzos de la física experimental de partículas elementales», más tarde denominada «de altas energías». De hecho, dos físicos que colaboraban en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, Patrick Blackett y el italiano, de la Universidad de Florencia, Giuseppe Occhialini obtuvieron los mismos resultados que Anderson, utilizando básicamente las mismas técnicas, aunque su hallazgo fue algo posterior: enviaron su artículo (Blackett y Occhialini 1933) a Physical Review tres semanas antes de que recibiese el segundo artículo de Anderson, que sin embargo apareció antes.[41] Además, Blackett y Occhialini relacionaron los positrones con la teoría de Dirac. Así, después de manejar otras hipótesis, señalaban (Blackett y Occhialini 1933: 714): «parece más probable que [los electrones positivos] desaparezcan reaccionando con un electrón negativo para formar dos o más cuantos», un «mecanismo», añadían, «que se sigue inmediatamente de la teoría de Dirac de los electrones [...] En la teoría de Dirac, los electrones positivos deberían tener una vida corta, puesto que es fácil para un electrón negativo pasar a ocupar un estado libre, rellenando un hueco, lo que

conduce a la aniquilación simultánea de un electrón positivo y uno negativo, siendo la energía radiada como la de dos cuantos».

En su autobiografía, Anderson (1999: 34) se refirió a la recepción que se dio a su descubrimiento, especialmente en Cambridge, el lugar de trabajo de Blackett. Es interesante reproducir lo que escribió, pues ilustra el importante asunto de cómo se reciben nuevas ideas científicas revolucionarias: «Los físicos son un grupo difícil de convencer de lo correcto de un nuevo descubrimiento en física, pero yo no era consciente entonces de la fría recepción que mi anuncio iba a recibir en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, Inglaterra, bajo la dirección de Ernest Rutherford, ciertamente el laboratorio de física nuclear más famoso del mundo». Y a continuación citaba unos pasajes de un libro del historiador de la ciencia estadounidense Daniel Kevles (1978: 233):

En años posteriores, la aparición de una nueva partícula elemental apenas alteraría las sensibilidades intelectuales de los físicos del mundo; en 1932, el anuncio de Anderson del positrón produjo un muro de resistencia. Si el neutrón había solucionado muchas dificultades presentes en la teoría nuclear desde hacía tiempo, el positrón parecía complicar las cosas. Se dice que Niels Bohr rechazó de entrada el hallazgo de Anderson y que, cuando en el otoño de 1932 Millikan habló del positrón en una conferencia en el Cavendish, varios miembros de la audiencia sugirieron fríamente que sin duda Anderson había cometido algún error fundamental de interpretación. Pero no todos los físicos del grupo de Rutherford estaban dispuestos a ignorar las propuestas de Anderson, especialmente el experto en cámaras de niebla del Cavendish, Patrick M. S. Blackett.

Es tal vez difícil apreciar hoy, tan alejados como estamos del descubrimiento experimental del positrón y acostumbrados a un sinnúmero de otras sorprendentes novedades, lo que esto significó, tanto como un nuevo tipo de partícula elemental como por la confirmación de los trabajos anteriores de Dirac. Significativo es lo que escribió el físico teórico soviético, experto en física del estado sólido (recibió el Premio Nobel de Física en 1958), Igor Tamm, un buen amigo de Dirac, en una carta que dirigió a este el 5 de junio de 1933 (Kojevnikov 1993: 64):

Querido Dirac:

Siempre he sido un mal corresponsal, pero con los años cada vez lo soy peor. Siento muy agudamente los inconvenientes de esta limitación mía, ya que pierdo contacto con todo el mundo, incluso con aquellos más queridos y que considero más interesantes.

He estado a punto de escribirte muchas veces a lo largo de este año, especialmente después de que apareciese el artículo de Blackett y Occhialini. Suelo decir que tu predicción del antielectrón no tiene paralelo en la historia de la ciencia. Se puede pensar en Leverrier y Adams, pero tu caso es diferente. Tu predicción teórica de la existencia del antielectrón, inestable en el «espacio ordinario» fuera del núcleo, parecía tan extravagante y totalmente nueva, que no te atreviste a mantenerla y en su lugar preferiste abandonar la teoría. Y ahora el inesperado experimento te ha demostrado que estabas en lo cierto e incluso te presentó el neutrón, para hacer el «hueco» estable y formar un protón.[42]

El descubrimiento del positrón constituyó el primer ejemplo de antipartícula, o antimateria (un nombre no demasiado afortunado, ya que la «antimateria» es, por supuesto, un tipo de materia). «Creo», manifestó Heisenberg (1973: 271), «que el descubrimiento de la antimateria fue tal vez el mayor salto de todos los grandes saltos de la física de nuestro siglo. Fue un descubrimiento de la mayor importancia porque cambió toda nuestra idea de la materia». Y a continuación explicaba cómo se entendió inicialmente semejante hecho y algunas de las consecuencias a que dio origen:

Al principio, Dirac sugirió que se podían crear tales partículas [las antipartículas] mediante el proceso de producción de pares. Un cuanto de luz puede sacar a un electrón virtual de uno de estos estados negativos en el vacío y llevarlos a una energía positiva más grande, lo que significa que el cuanto de luz ha creado un par de electrón y positrón. Pero esto significaba de entrada que el número de partículas ya no era un buen número cuántico; no existía una ley de conservación para el número de partículas. Por ejemplo, según la nueva idea de Dirac, uno podría decir que el átomo de hidrógeno no consiste necesariamente de un protón y un electrón. Podría también estar formado temporalmente por un protón, dos

electrones y un positrón. Y de hecho, cuando se tienen en cuenta los detalles más finos de la electrodinámica cuántica, estas posibilidades desempeñan algún papel.

En el caso de la interacción entre radiación y electrón podía tener lugar un fenómeno como el de la producción de pares. Pero entonces sería natural suponer que procesos análogos podían suceder en un rango mucho más amplio de la física. Desde 1932, sabíamos que no hay electrones en el núcleo, que el núcleo está formado de protones y neutrones. Pero entonces Pauli sugirió que la desintegración β se podía describir diciendo que en el proceso se creaba un electrón y un neutrino. Esta posibilidad fue formulada por Fermi en su teoría de la desintegración β. Vemos, por consiguiente, que ya entonces se abandonó completamente la ley de conservación del número de partículas. Uno comprendía que existen procesos en los que se crean partículas a partir de energía. La posibilidad de tales procesos la daba ya, por supuesto, la teoría especial de la relatividad, con la energía transmutada en materia. Pero su realidad se dio por primera vez en relación con el descubrimiento de Dirac de la antimateria y la creación de pares.

La existencia de antimateria, descubierta inicialmente en el caso del electrón-positrón, se fue generalizando cuando se dispuso de aceleradores de partículas que alcanzaron energías suficientemente elevadas. Como explicaré en el capítulo 3, fue el grupo dirigido por Emilio Segrè, en Berkeley, quien logró en 1955 la evidencia definitiva de la existencia de la antimateria con el antiprotón.

PARTÍCULAS ELEMENTALES, YUKAWA Y LA FUERZA NUCLEAR [43]

El mismo año que Anderson descubrió el positrón (1932), un investigador del Laboratorio Cavendish, James Chadwick, encontró otra partícula elemental, una cuya existencia había ya sospechado Rutherford: el neutrón (Chadwick 1932). El descubrimiento del neutrón incidió directamente en cómo se entendió a partir de entonces el átomo. Hasta entonces se suponía que el núcleo —rodeado por electrones orbitando alrededor de él— estaba formado por protones y electrones. Que contenía electrones era algo que se suponía, puesto que los elementos radiactivos emitían radiación β, esto es, electrones. Y si no estaban en el núcleo, ¿de dónde iban a surgir? Y en este punto entra en escena un italiano, uno de los grandes físicos del siglo XX, Enrico Fermi (1933, 1934), que desarrolló una teoría para la desintegración β, el proceso en el que un elemento radiactivo emite electrones, una teoría que mejoraron, ya en la segunda mitad del siglo, en 1958, George Sudarshan y Robert Marshak, por un lado, y Richard Feynman y Murray Gell-Mann, por otro (volveré a este punto en el capítulo 3). En realidad, esta teoría trataba de la emisión β desde un punto de vista más general: entendiendo este proceso como manifestación de una fuerza, o interacción, fundamental de la naturaleza, diferente a la electromagnética, gravitacional y fuerte (la que une los componentes de los núcleos atómicos), una interacción que, debido a su magnitud, se denominó interacción (o fuerza) débil.

Fermi (1933) propuso que un neutrón se desintegra dando lugar a un protón, un electrón y un antineutrino (la antipartícula del neutrino, cuya existencia fue propuesta, en 1930, por Wolfgang Pauli para explicar el espectro continuo que se observaba en la energía de la radiación β emitida).[44] A esa teoría de Pauli, Fermi (1934) le añadió la idea de que neutrones y protones interaccionaban emitiendo y absorbiendo pares neutrino-electrón.

Antes de que Fermi propusiera su teoría para la desintegración β, y teniendo en cuenta el descubrimiento del neutrón, Heisenberg (1932 a, b, 1933) introdujo modificaciones en el modelo atómico vigente hasta entonces. Pero, aunque aceptaba que los constituyentes del núcleo eran protones y neutrones, para Heisenberg las verdaderas partículas elementales eran el protón y el electrón, ya que entendía que el neutrón no era sino un «compuesto» de protones y electrones. Semejante estructura le permitía introducir una teoría para la

interacción nuclear entre protones y neutrones, esto es, una teoría que explicaba la estabilidad de los núcleos atómicos. La idea de Heisenberg era similar a la del enlace químico homopolar; es decir, que la interacción entre neutrones y protones se debía a la posibilidad de «compartir» un electrón (al poseer carga eléctrica negativa, el electrón que formaba parte del neutrón atraía al protón, de carga positiva), mientras que si el «intercambio» de electrones entre neutrones y protones era incompleto, un electrón escapaba del núcleo, con lo que se ofrecía un modelo para la desintegración β. Además de lo anteriormente descrito, estos tres artículos de Heisenberg iniciaron el estudio moderno de la sistemática nuclear, puesto que incluían la curva de isótopos estables (A versus Z, donde A es el «número másico», o número de protones más neutrones, y Z el «número atómico», que coincide con el número de protones), el cálculo de defectos de masa y otros aspectos de las desintegraciones radiactivas.[45] Sin embargo, existían aún serios problemas en la comprensión del núcleo, como la violación de las leyes de conservación de energía y del momento angular, y el hecho de que el tipo de fuerza nuclear que introdujo no daba las propiedades correctas para los núcleos ligeros.

Pero retornemos a la fuerza, o interacción, nuclear entre protones y neutrones. El modelo de Heisenberg, y algunos aspectos de los trabajos de Fermi, pronto fueron corregidos por el físico japonés Hideki Yukawa (1907-1981), cuando propuso una nueva partícula, el «mesón», cuya función principal sería la de «transportar» la «señal» que une protones y neutrones, la fuerza nuclear, a la manera del fotón, o cuanto de acción, en la interacción electromagnética.[46] Lo que pretendía Yukawa (1935: 48) era explicar «la naturaleza de la interacción de las partículas elementales, de la que poco se sabe hoy en la teoría cuántica», y «modificar la teoría de Heisenberg y Fermi» y lo hacía de la siguiente manera, estableciendo que «la transición de una partícula pesada del estado de neutrón al estado de protón no siempre viene acompañada de la emisión de partículas ligeras, esto es, de un neutrino y un electrón, aunque la energía liberada en la transición algunas veces la toma otra partícula pesada, que a su vez se transforma del estado de protón al estado de neutrón».

Es decir, Yukawa (1935: 57) introdujo un «cuanto hipotético que tiene la carga elemental y la masa adecuada y que obedece la estadística de Bose. La interacción de semejante cuanto con la partícula pesada [neutrón o protón] debería ser mucho más intensa que la que se da con la partícula ligera, para explicar la fuerte interacción entre el neutrón y el protón, así como la pequeña probabilidad de la desintegración β. Si es que existen y se acercan a la materia lo

suficiente para ser absorbidos, tales cuantos llevarán su carga y energía a esa materia». «Si es que existen», decía, y también: «Estos argumentos, de, por supuesto, carácter meramente especulativo [...]». Suponía, asimismo, que tal vez la nueva partícula-cuanto tendría que ver con las «lluvias» de rayos cósmicos que llegaban a la Tierra.

La idea que introdujo Yukawa —entender la fuerza nuclear como una nueva interacción fundamental, transportada por una partícula— constituye un hito en la historia de la física cuántica, y de la física en general. A partir de este trabajo, se impuso ese modo de comprender las interacciones físicas que se dan en la naturaleza. Por este motivo es muy interesante comprender cómo llegó el físico japonés a esa idea. Y, para ello, me basaré en lo que él mismo explicó en su autobiografía (Yukawa 1982), concretamente en el último capítulo.

Explicaba allí (Yukawa 1982: 190): «La idea de que debería visualizarse el núcleo como una colección de neutrones y protones debe habérsele ocurrido a un buen número de físicos al mismo tiempo, pero fue Heisenberg quien desarrolló de manera sistemática la nueva estructura nuclear. Me di cuenta de la importancia de su trabajo y escribí la introducción a sus artículos en las Actas de la Sociedad Físico-Matemática de Japón. Al mismo tiempo, decidí llevar la teoría un paso más allá. El problema en el que me centré fue el de la naturaleza de las fuerzas que actúan entre los neutrones y los protones que forman el núcleo; esto es, la naturaleza de las fuerzas nucleares. Al enfrentarme a este difícil problema, me sumergí en unos largos días de sufrimiento».

«La mayor parte de las fuerzas de la naturaleza no son primarias», continuaba (Yukawa 1982: 193-194), «por ejemplo, las fuerzas de atracción molecular, las fuerzas combinatorias de la química, son de naturaleza bastante compleja. Durante mucho tiempo no pudieron ser comprendidas, pero después de la aparición de la mecánica cuántica se hizo evidente que la atracción molecular y el enlace químico son fuerzas secundarias, derivadas de la atracción y repulsión electromagnética primaria que actúan, respectivamente, entre el núcleo y los electrones, y entre los electrones. Por consiguiente, tras la introducción de la mecánica cuántica, las únicas fuerzas reconocidas como primarias eran la gravitación universal y el electromagnetismo. Ambas fuerzas fundamentales se expresan como campos de fuerzas [...] Entonces surge la pregunta: ¿es la nueva fuerza nuclear primaria? ¿O es secundaria, derivada de las fuerzas gravitacional y electromagnética? Esta es la pregunta fundamental».

La gravitacional, se apresuraba a señalar, no podía ser la causa, debido a la pequeñez de protones y neutrones: era «demasiado débil para mantener unidos un compacto y fuertemente agregado sistema como es el núcleo». La electromagnética era más fuerte que la gravitacional, pero no lo suficiente como para ser la fuente de la fuerza nuclear, y no solo eso, como el neutrón no tiene carga, en el núcleo —del que ya se habían desterrado los electrones— únicamente se darían fuerzas de repulsión entre protones. «En cualquier caso», señalaba, «algo muy extraño debe intervenir si se quiere pensar en la fuerza nuclear como derivada de las fuerzas electromagnéticas, como una fuerza secundaria. Por consiguiente, parecía probable que la fuerza nuclear fuese una tercera fuerza fundamental, no relacionada con la gravitación o el electromagnetismo. Entonces, acaso pudiese también encontrar la fuerza nuclear expresión como un campo.

Tuve la idea de un campo de fuerza nuclear muy pronto. Considerado desde el punto de vista de la mecánica cuántica, un campo de fuerza implica, casi por necesidad, que existe una partícula que acompaña al campo. De hecho, inferimos la existencia del fotón como la partícula que acompaña al campo electromagnético. Expresado de esta forma, la respuesta estaba casi al alcance de la mano, pero mi cerebro no funcionó tan rápidamente. Primero tomé un camino equivocado, antes de que pudiese llegar a mi destino [...] Visto retrospectivamente, estuve muy cerca de mi destino en 1932. Si hubiese perseguido la idea de un campo de fuerza nuclear, y aplicado el razonamiento de la mecánica cuántica, habría sido capaz de llegar a la idea del mesotrón [el nombre que utilizaba Yukawa aquí para el mesón]».

«El electrón», continuaba más adelante (Yukawa 1982: 196), «parecía ser un poderoso candidato porque los electrones no solo estaban alrededor del núcleo sino que a veces salían de él [...] Heisenberg ya había presentado su opinión de que la “pelota”, en el juego nuclear de “atrapar”, era el electrón, Al principio, yo también decidí seguir esta línea de investigación. En abril de 1933, la Sociedad Físico-Matemática de Japón celebró una reunión en la Universidad Tohoku, en Sendai. En aquella ocasión, presenté mi primer informe sobre el tema, “Los electrones dentro del núcleo”. No tenía mucha confianza en esa investigación y al final no publiqué el artículo en una revista. Existían muchas dificultades obvias para tratar el electrón como la “pelota” intercambiada entre neutrones y protones. En primer lugar, las características del electrón, como su espín y el tipo de estadística que obedecen, hacen al electrón inadecuado para este papel. Sin embargo, intenté utilizar el campo del electrón que satisface la ecuación de onda

de Dirac como el campo de la fuerza nuclear».

También intentó basarse en las ideas de Fermi; esto es, «si los neutrones y protones podrían jugar a “atrapar” utilizando un par de partículas, a saber, un electrón y un neutrino. La “pelota” seria reemplazada por un par de partículas. Cuando empecé a pensar seriamente en semejantes términos, varios científicos extranjeros estaban trabajando en la misma idea y sus investigaciones aparecieron en las revistas. Sin embargo, los resultados eran negativos; la fuerza que resultaba del intercambio del par, electrón y neutrino, era incomparablemente más pequeña que la fuerza nuclear. Este resultado negativo me animó y abrió mis ojos, de manera que pensé: no busquemos una partícula para el campo de la fuerza nuclear entre las partículas conocidas, incluyendo el nuevo neutrino. Si me centro en las características del campo de fuerzas nuclear, entonces las características de la partícula que busco se me harán manifiestas. Cuando empecé a pensar de esta manera, casi había alcanzado mi propósito» (Yukawa 1982: 201).

El momento crucial llegó en octubre de 1934 (Yukawa 1982: 202):

La fuerza nuclear es efectiva a distancias extremadamente pequeñas, del orden de 0,02 trillonésimas de centímetro. Esto es lo que sabía. Mi nueva idea fue darme cuenta de que esta distancia y la masa de la nueva partícula que estaba buscando están inversamente relacionadas entre sí. ¿Por qué no me había dado cuenta de esto antes? A la mañana siguiente, abordé el problema de la masa de la nueva partícula y encontré que era aproximadamente doscientas veces la del electrón. También tenía que tener, más o menos, la carga del electrón. Por supuesto, semejante partícula no había sido encontrada, así que me pregunté: «¿Por qué?». La respuesta era sencilla: para crear tal partícula se necesitaría una energía de 100 millones de electrón-voltios, y entonces no existía un acelerador con el que se pudiese alcanzar tal energía.

Yukawa presentó públicamente sus resultados, poco después de completarlos, en una reunión local de la Sociedad Físico-Matemática de Japón, que tuvo lugar en Osaka. El 17 de septiembre hacía lo mismo en la reunión anual de la Sociedad, celebrada en Tokio. Entremedias, y animado por su esposa, preparó una versión

en inglés, que apareció en la revista de dicha Sociedad japonesa. El artículo, recibido el 30 de noviembre, se publicó en el número de febrero de 1935.

La propuesta teórica de Yukawa obtuvo reconocimiento internacional en 1937, cuando Seth Neddermeyer y Carl Anderson (1937), del California Institute of Technology, descubrieron en los rayos cósmicos partículas de masa aproximadamente 200 veces la del electrón, y con cargas positivas y negativas. Fuera de Japón, la primera mención a su trabajo de 1935 apareció en una carta que Oppenheimer y Robert Serber (1937) enviaron el 1 de junio a Physical Review. El propio Yukawa (1937) escribió una nota el 2 de julio, que publicó en la revista de la Sociedad Físico-Matemática de Japón, relacionando las nuevas partículas identificadas en los rayos cósmicos. Parecía por consiguiente que los rayos cósmicos contenían los cuantos de la fuerza nuclear (interacción fuerte), ya que, no lo olvidemos, tal era la función para la que Yukawa pensó su partícula. Finalmente no sería así: cuando se encontró el cuanto de la fuerza nuclear sus propiedades diferían de las que Yukawa había predicho. La partícula que se ajustaba a las características previstas por Yukawa fue identificada, de nuevo en rayos cósmicos, por un equipo liderado por el físico inglés Cecil Powell, que utilizó unas técnicas sofisticadas de emulsiones fotográficas. En 1947, ese equipo (Lattes, Muirhead, Occhialini y Powell 1947) anunció que habían descubierto mesones que al final de su trayectoria daban lugar a mesones «secundarios». El análisis de las trazas de esos mesones primarios y secundarios, indicó que, probablemente, existían dos clases de mesones, con masas diferentes. A los primarios se les denominó mesón π y a los secundarios, mesón μ. Estudios subsiguientes en el laboratorio de Powell, determinaron que la masa del mesón π era 1,35 veces la del mesón μ. La masa del mesón π era 286 veces la del electrón, mientras que la del mesón μ era 216 veces. Este, el mesón μ, resultó ser el mismo que habían hallado en 1937 los científicos norteamericanos.[47]

Vemos así cómo de una situación, en la década de 1920, en la que las únicas partículas elementales eran el protón y el electrón, se pasa, en la década de 1930, a otra en la que a esas partículas se sumaban el neutrón, el positrón, el neutrino y los mesones π y μ, un preludio de lo que habría de venir en el futuro, cuando se dispuso de máquinas (aceleradores de partículas) que alcanzaron las energías adecuadas.

En 1949, Yukawa recibió el Premio Nobel de Física por, según el Comité Nobel, «su predicción de la existencia de mesones en base al trabajo teórico sobre fuerzas nucleares». Cecil Powell también recibió el mismo galardón: el

correspondiente a 1950, «por su desarrollo del método fotográfico para estudiar procesos nucleares y sus descubrimientos sobre mesones realizados con este método».

UNA NOTA SOBRE JAPÓN

Hasta ahora nos hemos encontrado, básicamente, con científicos europeos o norteamericanos. Con Hideki Yukawa aparecen los japoneses, y no será el único: pronto hará su entrada Sin-Itiro Tomonaga, ambos hijos de profesores de la Universidad de Kioto y graduados por esta misma universidad, donde estudiaron bajo la influencia de Kajuro Tamaki. Es por ello apropiado decir algo acerca de la física en Japón; más concretamente, si Yukawa y Tomonaga fueron simplemente excepciones, o manifestaciones de una ciencia avanzada.

A este respecto, lo primero que hay que notar es que hasta la Primera Guerra Mundial la disciplina más potente en Japón era la medicina. Incluso, y a pesar de los cambios introducidos durante la reformista era Meiji (1868-1912), esta situación no varió de forma significativa. Sí lo hizo después de 1918. Como ha explicado el mejor conocedor occidental de la historia de la ciencia japonesa contemporánea, James Bartholomew (1997: 882), «la Primera Guerra Mundial fue probablemente el punto de inflexión más importante en la historia moderna de la ciencia japonesa. A la postre, la guerra forzó a las élites japonesas a apoyar de manera sistemática a prácticamente todos los principales campos de estudio científico, en lugar de hacerlo de forma ad hoc como se había hecho con anterioridad, y esto condujo a que los militares prestasen atención a la investigación científica japonesa. Así se crearon las condiciones institucionales que apoyarían el que la física nuclear japonesa alcanzase prominencia mundial en el periodo de entreguerras. Ello indujo un cierto desplazamiento en la atención japonesa, alejándola de la ciencia alemana y llevándola hacia la de Estados Unidos. Estimuló una mayor independencia investigadora. Y condujo a los investigadores científicos japoneses y a los comportamientos de investigación a una relación más íntima con todas las comunidades científicas del mundo».[48]

El que se produjese semejante cambio se debió a que, a pesar de que durante la Primera Guerra Mundial Japón se aliase formalmente con Gran Bretaña y Francia, sufrió grandes inconvenientes con la decisión de los aliados de bloquear a Alemania, de la que el Imperio del Sol Naciente dependía fuertemente a través de importaciones de productos químicos y farmacéuticos, tintes e instrumentos de precisión. Consecuencia de ello fue la aparición de un sentimiento de crisis

que estimuló el apoyo a la ciencia, a la física y química en particular. En 1917, por ejemplo, se creó un Instituto de Investigación de Física y Química, del que se venía hablando sin llegar a concretar nada desde antes de 1914. Y a partir de entonces fueron frecuentes las visitas a Japón de destacados físicos extranjeros: Einstein en 1922, Heisenberg y Dirac en 1929, y Bohr en 1937.

En resumen: ni Yukawa ni Tomonaga fueron luces aisladas en un oscuro mar de ignorancia o desdén científico, aunque en este libro sean muy pocos los que nos aparezcan, dejando de lado científicos tan notables como Hanretaro Nagaoka, Yoshio Nishina, bajo cuya dirección Tomonaga trabajó algún tiempo, Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa o Shoichi Sakata.

LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA, LA SEGUNDA CUANTIZACIÓN, RENORMALIZACIÓN Y LA TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS [49]

Junto a la necesidad de hacer compatible la mecánica cuántica con la relatividad especial, existía otro problema obvio: cuantizar la electrodinámica de Maxwell; esto es, introducir los requisitos cuánticos en el electromagnetismo. Semejante tarea daría lugar a la «electrodinámica cuántica».[50]

También aquí Dirac fue el principal pionero, aunque no el único. Y también aquí encontró inspiración en su «filosofía de la belleza y armonía matemática». Veamos lo que escribió al respecto en una serie de conferencias que dictó en 1943 en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín sobre, precisamente, «Electrodinámica cuántica» (Dirac 1943: 1):

Estas conferencias, como las de Eddington, tratan de unificar la relatividad y la teoría cuántica, pero enfocan la cuestión desde un punto de vista diferente. El método de Eddington es, primero, tener las ideas físicas claras y entonces y de manera gradual construir un esquema matemático. El presente método es exactamente el opuesto: primero establecer un esquema matemático y después intentar obtener sus consecuencias físicas. Este método debería ser más sencillo, porque se enfrenta en primer lugar a la tarea más fácil. Debería ser más fácil obtener el esquema matemático, porque para esto el número de cosas que se tienen que escoger es menor. Para que sea aceptable, el esquema debe ser nítido y bello, y el número de tales esquemas que la matemática pura puede suministrar es muy limitado. Cuando se decida cuál es el esquema matemático, la tarea subsiguiente de encontrar su interpretación física será más fácil debido a la existencia de muchos puntos de contacto entre la matemática y la física.

Tras estas cuestionables suposiciones, Dirac pasaba a detallar sus intenciones:

Nos ocuparemos del problema de la interacción de un número de partículas cargadas con el campo electromagnético, y nuestro objetivo será obtener un método para calcular resultados experimentales, tales como la probabilidad de

que ciertas partículas [...] sean desviadas, emitiendo y absorbiendo, acaso, algunos fotones.

Cuando dictó sus conferencias en Dublín, ya hacía tiempo que Dirac había iniciado el camino hacia la formulación de una electrodinámica cuántica. Su primer trabajo en este sentido, y el que abrió el campo, apareció en 1927, antes, por consiguiente, que el de la ecuación relativista del electrón. Se tituló «La teoría cuántica de la emisión y la absorción de radiación» (Dirac 1927). Según Dirac, la teoría cuántica, basada en variables dinámicas que no conmutan, ya estaba entonces lo suficientemente desarrollada como para «formar una teoría razonablemente completa» de cualquier sistema dinámico compuesto por un número de partículas que interaccionan a través de fuerzas instantáneas» (Dirac 1927: 243). El problema era que la relatividad especial impedía fuerzas instantáneas, y por eso «poco se ha hecho hasta ahora sobre la electrodinámica cuántica»; esto es, en relación a la interacción de electrones —en general, partículas cargadas— con el campo electromagnético. En su artículo, Dirac consideró dos enfoques posibles, que pueden caracterizarse como «corpuscular» y «ondulatorio»: en el primero describía el campo como un conjunto infinito de cuantos de luz (fotones) que no interaccionaban entre sí, satisfacían la estadística de Bose-Einstein y se movían a la velocidad de la luz, mientras que en el segundo tomaba el campo electromagnético como una onda (que descomponía en serie de Fourier). A pesar de su interés, la teoría que presentaba Dirac era insatisfactoria en varios aspectos (por ejemplo, no incluía la parte coulombiana de la interacción entre cargas, y, un defecto particularmente grave, la invariancia relativista era problemática). Pero uno de los procedimientos que introdujo sería tremendamente influyente: la segunda cuantización; esto es, la cuantización de la función de onda de una partícula individual. Expresado de otra forma, lo que hizo fue tomar la función de onda, Ψ, de un sistema ya cuantizado y convertirla en un operador; en otras palabras: cuantizar por segunda vez el sistema. El propio Dirac se refirió a esta aportación en un artículo publicado mucho después (Dirac 1983: 48):

Al desarrollar más la mecánica cuántica de Heisenberg y Schrödinger, se me ocurrió aplicar un proceso que había sido denominado segunda cuantización. Uno simplemente toma la función de onda de la teoría de Schrödinger, la función de onda $\Psi(q)$ (q es una variable que especifica un punto en el dominio de la función de onda), y supone que todas las $\Psi(q)$ para valores diferentes de q se han

convertido en operadores en lugar de ser números. Entonces se toman los conjugados [complejos] Ψ*(q) y se les convierte también en operadores. Se supone que las Ψ(q) conmutan entre sí, y lo mismo las Ψ*(q), pero que las Ψ*(q) no conmutan con las Ψ(q). Me parecía una idea muy interesante, y me pregunté adonde conduciría. Funcionó y encontré que llevaba a un conjunto tal de sistemas, todos obedeciendo la estadística de Bose.

Le desanimó, sin embargo, el que «no produjese nada realmente nuevo», pero, de todas maneras, «originó una nueva manera de entender la estadística de Bose y, en particular, atrajo la atención sobre los operadores Ψ(q) y Ψ*(q). Resultaron ser los operadores que incrementaban, o disminuían, la excitación de uno de los estados en un cuanto. En consecuencia, estos operadores de emisión y absorción se han convertido en las variables básicas más útiles para describir un conjunto de bosones». La emisión y absorción significaba creación y aniquilación de fotones, una novedad más en el cuerpo de la física cuántica.[51]

El artículo de Dirac de 1927 (al que habría que añadir el de 1928, con la ecuación relativista del electrón) sobre la electrodinámica cuántica no fue el único que intentaba formular una teoría cuántica relativista de un sistema con infinitos grados de libertad (como sucede con los campos). También es obligado recordar las contribuciones de Born, Jordan, Fermi, Fock, Heisenberg y Pauli, entre otros. En una serie de trabajos, en los que se centraba en el campo como entidad primordial, Pascual Jordan (uno de los tres firmantes del artículo conocido como el Dreimännerarbeit [Born, Heisenberg y Jordan 1926], en el que se desarrolló la mecánica cuántica de matrices formulada inicialmente por Heisenberg en 1925) profundizó en la idea de segunda cuantización, extendiéndola a fermiones. «Los resultados obtenidos aquí», escribía en uno de sus artículos (Jordan 1927), «dejan pocas dudas sobre que se pueda formular una teoría cuántica de campos de la materia en la que los electrones estén representados por ondas cuantizadas en el espacio tridimensional habitual —incluso aunque los electrones satisfagan la estadística de Pauli (de Fermi-Dirac) en lugar de la de Bose—, y de que la formulación natural de la teoría cuántica de electrones se obtiene concibiendo simultáneamente radiación y materia como ondas que interaccionan en un espacio tridimensional». De entre los artículos que escribió entonces Jordan, dos de ellos, el que firmó con Oskar Klein, cuando ambos coincidieron en el Instituto de Física de Copenhague, y el de Eugene Wigner, son particularmente importantes.[52] En el primero (Jordan y Klein

1927) extendían los métodos de Dirac a bosones con masa, mientras que en el segundo (Jordan y Wigner 1928) la extensión era para fermiones. Al tratar con bosones con masa y fermiones, estos trabajos se referían a una teoría cuántica de campos general, de la que la electrodinámica cuántica sería un caso especial.

Otro de los mojones en el camino hacia una electrodinámica cuántica fue el artículo que reunió, nada más y nada menos, que a Heisenberg y Pauli, los dos antiguos compañeros y discípulos de Arnold Sommerfeld en Múnich. Aunque el muy susceptible y demasiado propenso a criticar los trabajos de los demás Pauli había sido reacio a aceptar los puntos de vista de Jordan sobre la cuantización de campos con masa, se convenció de su validez a raíz de la aparición del artículo de Jordan y Klein. Esto llevó a un trabajo en colaboración (Heisenberg y Pauli 1929) cuyo resultado fue una teoría cuántica de campos que cuando se aplicaba a la interacción electromagnética daba un tipo de electrodinámica cuántica, en ciertos aspectos más satisfactoria que todo lo que se disponía hasta entonces: era invariante relativista, cuantizaba la radiación además de las «ondas de materia» (esto es, los campos asociados a partículas). «La teoría Heisenberg-Pauli», escribió el historiador de la ciencia danés Helge Kragh (2007: 191), «fue una obra maestra de física matemática y el fundamento de futuras teorías de electrodinámica cuántica, pero también era complicada e indigerible para la mayoría de los físicos». Y no era solo que fuese complicada: existían, además, serios problemas. Cuando se aplicaban sus ecuaciones fundamentales, no resultaba posible encontrar soluciones exactas, por lo que había que recurrir al método de perturbaciones; esto es, comenzar por las ecuaciones en el caso de que no exista interacción —situación que sí se podía resolver de manera exacta — para ir luego añadiendo a esta solución términos correctivos (obtenidos mediante un proceso iterativo), en un desarrollo en serie. En principio, cada uno de esos términos sucesivos debería ser menor que el anterior —la condición, obviamente necesaria, para que la serie convergiese—, pero en lugar de esto se encontraba que algunos términos de la serie daban valores infinitos, un resultado que no tenía sentido físico. Inicialmente, esos infinitos fueron identificados como debidos a la «autoenergía» de las partículas, es decir, a la interacción de las partículas con su propio campo, consecuencia, a su vez, de suponer que esas partículas eran puntos, sin volumen ni forma. Se podía argumentar que, al fin y al cabo, este problema no era exclusivo de la teoría cuántica, ya que también aparecía en la electrodinámica clásica, y ello no había impedido que se siguiese utilizando, pero no tardaron en hallarse divergencias (infinitos) propiamente cuánticas. Así, en 1929-1930, al desarrollar un método para integrar las ecuaciones de ondas relativistas en el caso de la interacción entre protones y

neutrones y de estos con el campo electromagnético, el joven físico estadounidense Robert Oppenheimer (1929, 1930), que conoció de primera mano el trabajo de Heisenberg y Pauli (al estar pasando varios meses de 1929 en Zúrich, aprendiendo de Pauli, con una beca de la International Education Board de la Fundación Rockefeller), demostró la existencia de una divergencia cuadrática (del tipo x^2) que debería provocar un desplazamiento infinito de la posición de las líneas espectrales; y cuando se incorporaba el positrón de Dirac a la teoría de Heisenberg-Pauli, la contribución a la densidad de carga eléctrica debida a la polarización del vacío, surgía una nueva divergencia.[53] Ante esta situación, las reacciones oscilaron entre ignorar los términos superiores al primero, en vista de que sus predicciones se ajustaban a los datos experimentales de que se disponía entonces, o pensar que se necesitaban nuevos y profundos cambios: «Creo firmemente», escribía Bohr a Dirac el 29 de agosto de 1930, «que la solución de los problemas actuales no se alcanzará sin una revisión de nuestras ideas físicas generales aún más profunda de la que se contempla en la mecánica cuántica actual».[54]

A pesar de que continuaron publicándose artículos interesantes (como los debidos a Lev Landau y Rudolf Peierls [1931], por un lado, y Bohr y Léon Rosenfeld [1933] por otro, sobre la mensurabilidad de las magnitudes del campo electromagnético, desde el punto de vista de la física cuántica), la situación tardaría en cambiar.[55] No lo haría hasta pasada la Segunda Guerra Mundial. Entre las razones que ayudan a comprender este hecho, destaca el que la mayoría de los principales protagonistas de la electrodinámica que finalmente surgió, abandonaron la investigación básica durante los años de guerra: Julian Schwinger trabajó en el Radiation Laboratory del Massachusetts Institute of Technology (MIT), ocupándose de las propiedades de las cavidades de microondas y ayudando a desarrollar radares más potentes, y Richard Feynman en el Laboratorio de Los Alamos del Proyecto Manhattan.[56]

Y en este punto hay que dar paso a Willis E. Lamb (1913-2008), quien sería determinante en la dirección que tomaría, después de la guerra, la física cuántica. Pese a haberse graduado en Química en la Universidad de California, campus de Berkeley, Lamb se centró posteriormente en la física, convirtiéndose, también en Berkeley, en un estudiante graduado de esta materia y en miembro del grupo de Robert Oppenheimer, quien por entonces estaba comenzando a formar en torno a él una escuela de físicos teóricos, cuánticos sobre todo, tanto en Berkeley como en el California Institute of Technology, en Pasadena (California), ya que pasaba medio año en cada una de esas dos instituciones. Formar parte del círculo de

Oppenheimer —de quien tendré ocasión de tratar nuevamente en otros lugares de este libro— significaba tener acceso privilegiado a los problemas más candentes en física nuclear y electrodinámica cuántica, aunque hay que decir que las relaciones entre Lamb y el no fácil Oppenheimer no fueron todo lo fluidas que deberían o podrían haber sido. Una vez que Lamb obtuvo su doctorado, en 1938, Isidor Rabi le ofreció un puesto de instructor en la Universidad de Columbia (Nueva York). Allí, en un grupo del que, entre otros, formaba parte Schwinger, Lamb trabajó en varios problemas, algunos de ellos de física nuclear y haces moleculares, el dominio en el que brillaba Rabi, que en 1944 obtendría el Premio Nobel de Física «por su método de resonancia para registrar las propiedades magnéticas de los núcleos atómicos». Al llegar la guerra, Lamb no pudo participar inicialmente, como hicieron la mayor parte de sus colegas, en proyectos secretos, como el desarrollo del radar o la fabricación de armas atómicas, debido a estar casado con una extranjera. Pero en 1943, se le levantó la prohibición y Oppenheimer le ofreció participar en el Proyecto Manhattan, aunque rehusó. Sí aceptó, en cambio, trabajar en el grupo que Rabi dirigía en Columbia, una rama del ya citado Radiation Laboratory del MIT.

Aunque se incorporó a ese laboratorio como teórico, la habilidad de Lamb en el campo experimental —junto a Felix Bloch, Enrico Fermi e Isidor Rabi, fue uno de los pocos físicos del siglo XX que sobresalieron como teóricos al igual que como experimentales— le permitió ocuparse también de cuestiones relacionadas con magnetrones, tecnología de alto vacío y otras técnicas experimentales; por ejemplo, ayudó a diseñar un aparato para medir el coeficiente de absorción del vapor de agua en función de la longitud de onda de la radiación de microondas, un problema de obvia importancia para la transmisión a través de la atmósfera (en la que se encuentra vapor de agua) de señales en el rango de microondas. Ese trabajo constituyó un apoyo fundamental para las investigaciones de las que se ocupó al término de la guerra: medir la estructura fina del espectro del hidrógeno, un problema al que ya había sido introducido como estudiante graduado, cuando en uno de los cursos que siguió sobre física atómica (el profesor era Robert Brode) se encontró con algo que no le satisfizo: «Recuerdo lo mucho que me desengañó cuando las clases se centraron en el más simple de los átomos, el del hidrógeno, y la teoría se hizo aún más complicada debido a la relación entre las interacciones espín-órbita y la teoría de la relatividad. Esto me introdujo en el tratamiento relativista de Arnold Sommerfeld de 1916 de la estructura fina del hidrógeno que utilizaba la vieja teoría cuántica» (Lamb 1983: 313).

Lamb centró su atención, en la Universidad de Columbia, en el comportamiento de dos estados atómicos del hidrógeno que comparten el mismo número cuántico principal pero con números cuánticos del momento angular diferentes. La electrodinámica relativista que había desarrollado Dirac predecía que estos estados tenían la misma energía, lo que significaba que el espectro de microondas que implicase transiciones de estos estados mostraría una única línea.[57] Con la ayuda de uno de sus estudiantes, Robert Retherford, que había trabajado en haces atómicos y era un experto en sistemas de vacío y amplificadores dc (acoplados en continua), Lamb encontró que existían dos líneas (Lamb y Retherford 1947).[58]

Este fue el resultado que Lamb presentó —aún no se había publicado— en una exclusiva conferencia organizada en junio (2-4) de 1947 en Shelter Island, al este de Long Island, por la National Academy of Sciences, a la que solamente asistieron (era por invitación) 23 científicos, la mayoría teóricos.[59] El hallazgo constituyó la gran novedad del encuentro y los teóricos se pusieron inmediatamente manos a la obra para intentar explicar la desviación encontrada. El primero en hacerlo fue Hans Bethe, quien efectuó un primer y aproximado ingenioso cálculo en el tren que, finalizada la conferencia, le llevaba de la ciudad de Nueva York a Schenectady, situada al norte del estado de Nueva York.[60] Al regresar a la Universidad de Cornell, donde trabajaba, Bethe presentó sus cálculos en una conferencia, en la que manifestó que se necesitaba un método mejor que el suyo para explicar la medida de Lamb y Retherford, lo que significaba también, por supuesto, eliminar los infinitos que plagaban la teoría. Y en este punto entra en la historia Richard Feynman (1918-1988), que estaba asociado a Bethe en Cornell.[61] Veamos lo que dijo al respecto en su conferencia Nobel (Feynman 1972: 170-172):

Al regresar a Cornell [Bethe] dio una conferencia sobre el tema, a la que yo asistí. Explicó que es muy confuso imaginar exactamente cuál de los términos infinitos corresponde a qué, al tratar de realizar la corrección para el cambio infinito en la masa [...] Después de la conferencia, me acerqué a él y le dije: «lo puedo hacer por ti; te lo traeré mañana». Imagino que entonces sabía todas las formas conocidas para modificar la electrodinámica cuántica. Efectivamente, Feynman fue a ver a Bethe el siguiente día, pero no con la respuesta prometida sino para pedirle que le explicara «cómo calcular la auto-energía de un electrón, de forma que se pudiera comprobar si es finita». Bethe se lo explicó a Feynman,

y cuando este volvió a su despacho comenzó a «ir en círculos tratando de ver qué es lo que fallaba, porque estaba seguro de que todo tenía que resultar finito; no podía comprender por qué salía infinito. Me interesé cada vez más y al final me di cuenta de que tenía que aprender cómo realizar un cálculo. De manera que a la postre me enseñé a mí mismo cómo calcular la auto-energía de un electrón, encontrando pacientemente mi propio camino a través de la terrible confusión de aquellos días, de estados de energía negativa y agujeros y contribuciones longitudinales y cosas por el estilo. Cuando al final encontré cómo hacerlo y lo hice con las modificaciones que quería sugerir, resultó que era agradablemente convergente y finito, justo como había imaginado.

Todo aquello le llevó aproximadamente dos meses. «El resto de mi trabajo», añadía en la conferencia Nobel, «fue simplemente mejorar las técnicas de que se disponía entonces para calcular, construyendo diagramas para ayudar a analizar de manera más rápida la teoría de perturbaciones». Completó dos artículos en abril y mayo de 1949. El primero, «La teoría de positrones» (Feynman 1949 a), interpretaba el positrón sin recurrir a la teoría de los agujeros de Dirac, mientras que el segundo, «Aproximación espacio-temporal a la electrodinámica cuántica» (Feynman 1949 b), contenía una serie de reglas y su explicación.

El neoyorquino y profesor de la Universidad de Harvard, Julian Schwinger (1918-1994) también asistió a la conferencia de Shelter Island, pero al contrario que Feynman se propuso formular la electrodinámica en base a primeros principios, uno de ellos explotar lo más posible las propiedades de simetría, entre ellas la covariancia Lorentz y la invariancia gauge: la formulación de la electrodinámica cuántica que elaboró cumplía estos requisitos de simetría.[62] Los primeros resultados los publicó en dos artículos (Schwinger 1948 a, 1949 b), mientras que el desarrollo de su teoría —demasiado técnica como para pretender explicarla aquí— precisó de tres, bajo el encabezamiento común de «Electrodinámica cuántica» (1948 b, 1949 a y c). El primero de los cinco artículos (Schwinger 1948 a) estaba dedicado a otro resultado experimental que desempeñó un papel importante en la configuración de la nueva electrodinámica cuántica, la determinación del momento magnético del electrón, que involucraba al denominado «factor gs», del espín del electrón, que según la ecuación de Dirac es igual a 2.[63] «El ejemplo más simple de corrección radiativa», escribía allí Schwinger, «es el de la energía de un electrón en un campo magnético externo. La aplicación detallada de la teoría demuestra que la corrección

radiativa a la energía de interacción magnética corresponde a un momento magnético adicional asociado con el espín del electrón, de magnitud $\delta\mu/\mu = (½\cdot\pi)\cdot e^2/\delta c = 0{,}001162$. Es gratificante que datos experimentales recientemente obtenidos confirmen esta predicción».

La corrección en cuestión que Schwinger había obtenido teóricamente, significaba que $gs = 2\cdot(1+0{,}001162)$, un resultado compatible con medidas experimentales recientes (de ahí la frase, «es gratificante que datos experimentales recientemente obtenidos confirmen esta predicción»). La primera medida precisa del momento magnético del electrón —cuya desviación del valor que se deducía cuando se utilizaba el factor gs de la teoría de Dirac, había sido predicha antes por Gregory Breit (1947), de la Universidad de Yale, aunque no por consideraciones de electrodinámica cuántica— se debió a Polycarp Kusch y Henry Foley (1947, 1948), de la Universidad de Columbia (como Lamb y Retherford). Sus resultados exigían que $gs=2\cdot(1+0{,}00119 \pm 0{,}00005)$, un valor compatible, como acabo de decir, con el cálculo efectuado por Schwinger.

Schwinger y Feynman presentaron sus resultados en una conferencia que se celebró en Pocono Manor, en Pensilvania, del 30 de marzo al 2 de abril de 1948, esto es, diez meses después de la de Shelter Island. Mientras que la presentación de Schwinger fue en un lenguaje matemático que los teóricos presentes —entre ellos Bohr, Dirac y Oppenheimer— podían comprender, la «intuitiva» de Feynman, con sus diagramas, tuvo grandes dificultades. Hans Bethe recordó muchos años después la reacción de los asistentes (Goodstein 1999: 273):

En la conferencia de Pocono, Feynman y Schwinger presentaron sus versiones de electrodinámica cuántica. Todo el mundo se quedó tremendamente impresionado por Schwinger, que, desde luego, había realizado un bello trabajo. Estaba relacionado con el viejo estilo de considerar la electrodinámica cuántica, de manera que la gente podía entenderlo fácilmente. Y Feynman tenía una forma completamente nueva de mirar a las cosas, que yo conocía pero que la mayoría de los demás encontró extraña. Y especialmente Niels Bohr, que, después de todo, era el líder de todos nosotros. Niels Bohr no pudo entenderlo, no creyó en él, ofreció varios cortantes argumentos en su contra y trató a Feynman bastante mal.

En el mismo sentido, es oportuno recordar lo que dijo el físico de origen chino Chen Ning Yang —que, como veremos en el capítulo 3, en 1957 obtuvo el Premio Nobel de Física, compartido con Tsung-dao Lee, por el trabajo que ambos realizaron sobre la violación de la paridad en la interacción débil—, pero que desarrolló la mayor parte de su carrera en Estados Unidos, principalmente en la Universidad Estatal de Nueva York en Stoney Brook (comenzó en 1946, como un estudiante de doctorado en la Universidad de Chicago bajo la dirección de Edward Teller), con respecto a la reunión de Pocono (Chen Ning Yang 1996: 176):

Entonces llegó la famosa Conferencia de Pocono (30 de marzo - 2 de abril, 1948). Yo no asistí a ella. Entonces era un simple estudiante graduado. De Chicago, asistieron Fermi, Teller y Wentzel. Normalmente, Fermi no tomaba notas cuando iba a una conferencia. Pero esta vez tomó muchas notas porque era consciente de que escuchar lo que Schwinger tenía que decir constituía un hecho histórico. Una vez que regresó a Chicago, estaba la cuestión de digerir esas notas. Fermi reunió en su despacho a Teller y a Wentzel, y a cuatro estudiantes graduados, a saber, Geoffrey Chew, Murph Goldberger, Marshall Rosenbluth y yo, y pasamos semanas tratando de digerir lo que Fermi había escrito sobre lo que Schwinger había dicho. Esto duró de abril a mayo de 1948. Murph conserva las notas. Yo tengo todavía una copia de ellas; totalizan 49 páginas. Después de, aproximadamente, seis semanas de reunirnos varias veces cada semana en el despacho de Fermi durante unas dos horas cada sesión todos estábamos muy cansados y ninguno de nosotros sentía que habíamos comprendido lo que Schwinger había hecho. Solamente sabíamos que Schwinger había hecho algo brillante [...]

Al final de nuestras semanas de trabajo, alguien preguntó: «¿No es cierto que Feynman también habló [en Pocono]?» Los tres dijeron, «Sí, sí, Feynman habló». «¿Qué dijo?» Ninguno de ellos pudo contestar. Todo lo que recordaban era la extraña notación de Feynman.

He citado los pasajes de Bethe y Yang porque muestran que la formulación que Feynman produjo de la electrodinámica cuántica recibió poca atención al principio, siendo como sería más tarde la que se impuso como herramienta de

trabajo de los físicos que necesitaban recurrir a esa teoría.[64] La pregunta obvia es: ¿cómo es que la versión de Feynman terminó imponiéndose a la de Schwinger? La respuesta a esta cuestión tiene un nombre propio: el de un joven matemático inglés (estudió en Cambridge), que después de la Segunda Guerra Mundial, y tras pasar un tiempo en el Imperial College de Londres y en Cambridge, reconvirtiéndose en físico, se trasladó a Estados Unidos en 1947, a la Universidad de Cornell: Freeman Dyson (n. 1923).[65]

Para explicar el papel de Dyson en la versión de Feynman de la electrodinámica cuántica, lo mejor es recurrir a sus propias palabras, en concreto a los comentarios que incluyó en una edición de sus trabajos científicos (Dyson 1996: 10-12). Allí, explicó que cuando todavía vivía en Inglaterra conoció en Cambridge a Nikolas Kemmer. Este había sido estudiante de Gregor Wentzel, quien, en 1943, había publicado el único texto sobre la teoría cuántica de campos que existía en 1946: Quantentheorie der Wellenfleder. Y Kemmer poseía un ejemplar de él: «En aquella época era un tesoro sin precio. Creo que existían solo dos copias en Inglaterra. Más tarde fue reimpreso en América y traducido al inglés. Pero en 1946, pocas personas sabían en América de su existencia y menos aún lo consideraban importante», señalaba Dyson. Kemmer le explicó a Dyson por qué el libro era importante y se lo prestó. «Sucedió así», añadía Dyson, «que cuando llegué a Cornell como estudiante, me encontré con que, gracias a Kemmer, era la única persona de toda la universidad que sabía sobre teoría cuántica de campos. El gran Hans Bethe y el brillante Richard Feynman me enseñaron mucho sobre muchas áreas de la física, pero cuando tenían que tratar con la teoría cuántica de campos yo era el maestro y ellos los estudiantes. Bethe y Feynman habían estado haciendo física con éxito durante muchos años sin la ayuda de la teoría cuántica de campos y no estaban ansiosos de aprenderla. Fue mi suerte que llegué con este regalo de Europa, exactamente en el momento en que los nuevos precisos experimentos de Lamb y otros, sobre los detalles finos de los niveles atómicos de energía, necesitaban de la teoría cuántica de campos para su correcta interpretación. Cuando utilicé la teoría cuántica de campos para calcular un número experimental, el desplazamiento de Lamb que separaba los niveles de energía de dos de los estados en un átomo de hidrógeno con un electrón sin espín, Bethe quedó impresionado. Dijo que era la primera vez que había visto que la teoría cuántica de campos era útil para algo. Para Bethe, la maquinaria matemática formal no tenía sentido a menos de que se pudiese utilizar para calcular números. Para él, calcular números era el objetivo del juego [...] Julian Schwinger conocía la teoría cuántica de campos desde hacía mucho. Pero compartía el punto de vista americano de que se trataba de una

extravagancia matemática, que mejor había que evitar salvo que se mostrase esencial. En 1948 comprendió que podría ser útil. La utilizó para sus cálculos de los desplazamientos en los niveles de energía mostrados por los experimentos de Lamb y Retherford, Foley y Kusch en Columbia. Pero la utilizó a regañadientes. En sus publicaciones, prefería no hablar explícitamente de la teoría cuántica de campos. En su lugar, habló de Funciones de Green [...] En los artículos de Schwinger podía reconocer a algunas de mis viejas amigas, funciones que había visto antes en el libro de Wentzel».

Y tras elaborar un poco sobre los métodos empleados por Schwinger, pasaba a Feynman:

En Cornell, estaba aprendiendo la forma bastante diferente de calcular procesos atómicos de Richard Feynman. Feynman nunca se había interesado por la teoría cuántica de campos. Su método se basaba en cosas que él llamaba «propagadores», que eran amplitudes de probabilidad para que las partículas se propagasen de un punto del espacio-tiempo a otro. Cada propagador estaba representado gráficamente por una colección de diagramas. Cada diagrama daba una imagen pictórica de partículas que se movían a lo largo de líneas rectas y colisionaban entre sí en los puntos donde se encontraban las líneas. Cuando aprendí esta técnica de Feynman de dibujar diagramas y calcular propagadores, la encontré desconcertante, porque daba siempre la respuesta correcta pero no parecía basarse en ninguna base matemática sólida. Feynman llamaba a su forma de calcular procesos físicos «el enfoque espacio-temporal», porque sus diagramas representaban sucesos como teniendo lugar en lugares particulares y en instantes particulares. Los propagadores describían secuencias de sucesos en el espacio-tiempo. Más tarde se vio que los propagadores de Feynman no eran sino otro tipo de funciones de Green. Feynman había estado hablando toda su vida el lenguaje de las funciones de Green sin saberlo.

En este punto tengo que hacer un alto en la narración de Dyson para introducir un tercer personaje en la historia de la elaboración de la electrodinámica cuántica: Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979) al que ya mencioné brevemente en el apartado «Nota sobre Japón».

Al regresar a Princeton de la conferencia de Pocono, Oppenheimer se encontró con trabajos que Tomonaga había hecho en la Universidad de Educación de Tokio inmediatamente después de la finalización de la Segunda Guerra Mundial y que contenían una versión de la electrodinámica cuántica no muy diferente de la de Schwinger. Oppenheimer envió una copia de la carta a los participantes en la reunión de Pocono y urgió a Tomonaga, mediante un telegrama, a que escribiese un resumen de su trabajo para Physical Review. El artículo, un resumen realmente, se publicó enseguida (Tomonaga 1948), con una nota de Oppenheimer. Contenía referencias a artículos anteriores publicados en la revista en idioma inglés Progress in Theoretical Physics (entre ellos, Tomonaga 1946, Koba y Tomonaga 1947, Ito, Koba y Tomonaga 1947).

Y ahora, ya sí, continuemos con la cita de Dyson (1996: 12-13):

Las funciones de Green también aparecían en el trabajo de Sin-Itiro Tomonaga, que había desarrollado de manera independiente una nueva y elegante versión de teoría cuántica de campos relativista [...] Tomonaga era un físico de la tradición europea, habiendo trabajado con Heisenberg, en Leipzig, antes de la guerra. Para él, al contrario que para Schwinger y Feynman, la teoría cuántica de campos era un lenguaje natural y familiar con el que pensar [...] Cuando los artículos de Tomonaga comenzaron a llegar a América, me encantó ver que estaba hablando el lenguaje de la teoría cuántica de campos que yo había aprendido de Kemmer. No nos llevó demasiado tiempo juntar los varios ingredientes del pudding. Cuando el pudding estuvo cocinado, las tres versiones de la nueva teoría de átomos y electrones mostraron ser diferentes formas de expresar la misma idea básica. La idea básica era calcular funciones de Green para todos los procesos atómicos que se podía observar directamente. Las funciones de Green mostraron ser el nexo esencial entre los métodos de Schwinger y Feynman, y la teoría cuántica de campos relativista de Tomonaga proporcionaba la base matemática firme para las tres versiones de la electrodinámica cuántica.

Dyson (1949 a, b) presentó sus resultados en dos artículos, en los que, además de mostrar la profunda unidad que existía entre las tres versiones de electrodinámica cuántica, resolvió el problema práctico de hacerla fácil de utilizar, en especial la formulación de Feynman. Eso sí, no resolvió dos

cuestiones fundamentales: (a) cómo extender el método de forma que pudiese tratar con partículas que no fuesen electrones y fotones, y con interacciones diferentes a la electromagnética; y (b) si cualquier teoría cuántica de campos de interacciones relativistas era consistente matemáticamente.

Con respecto a este último punto, debo mencionar algo que no he tenido oportunidad hasta ahora de desarrollar y que está relacionado con un problema que ya he mencionado antes: la aparición de infinitos en los intentos de formular una electrodinámica cuántica. Para evitar esos problemas se introdujeron una serie de técnicas, denominadas renormalización, procedimiento mediante el cual se ajustaban los términos de una ecuación para hacer que los términos infinitos se hiciesen finitos. La «guerra contra los infinitos», como la denominó Victor Weisskopf (1983), había comenzado pronto; por ejemplo, el físico holandés Hendrik A. Kramers, que sucedió a Paul Ehrenfest, tras el suicidio de este, en la antigua cátedra de H. A. Lorentz en Leiden, dedicó muchas páginas a ese problema en un libro que publicó en 1938, Theorien des Aufbaues der Materie II (Leipzig).[66] Uno de los puntos en los que insistió Kramers, y del que, de hecho, habló en la conferencia de Shelter Island era el hecho de que solamente la masa experimental, mexp, del electrón, (esto es, la suma de la masa mecánica, m0, y de la masa electromagnética, mel) tenía significado físico, pero m0 y mel no se pueden observar por separado, y por tanto no importa si cada una, por sí misma, tiene valor finito o infinito. Debería, por consiguiente, introducirse mecanismos para eliminar m0 y mel de las ecuaciones y expresarlas únicamente en función de mexp (y sugería lo mismo para la carga del electrón).[67]

En sus artículos de 1949, Dyson también demostró que se podían eliminar las divergencias (los infinitos) de la electrodinámica cuántica a cualquier orden de aproximación. Schwinger y Feynman habían sido capaces únicamente de eliminar los infinitos de los cálculos más sencillos, los que involucraban solo una o dos partículas virtuales; o lo que es lo mismo, habían obtenido respuestas finitas para los términos en e^2 (e es la carga del electrón) de las series infinitas, pero no se habían ocupado de los términos infinitos que plagaban los más complicados términos en e^4, e^6 o superiores. Dyson demostró cómo se podían eliminar sistemáticamente de forma autoconsistente los infinitos, a cualquier orden de aproximación.

A partir de entonces, el requisito de ser renormalizable fue exigido a cualquier teoría cuántica de campos. Sin embargo, esto no quiere decir que la renormalización fuese algo que se aceptase sin más. Paul Dirac, por ejemplo, fue

uno de los más críticos con él. Así, en la cuarta y última edición de The Principles of Quantum Mechanics, escribió (Dirac 1967: 327):

Se ha conseguido establecer ciertas reglas que permiten eliminar de un modo coherente los infinitos que se derivan de las fluctuaciones, habiéndose obtenido con ello una teoría capaz de ser desarrollada, y a partir de la cual es posible obtener resultados que pueden ser confrontados con los experimentos. En la confrontación se ha encontrado buena concordancia, lo que indica que las reglas tienen cierta validez. Pero dichas reglas solo se pueden aplicar a problemas particulares, que por lo general son problemas de colisión, y no encajan en los fundamentos lógicos de la mecánica cuántica. Por tanto, no pueden ser consideradas como una solución satisfactoria.

Parece ser que hemos seguido, hasta donde es posible, el desarrollo lógico de las ideas de la mecánica cuántica tal y como se conocen hoy en día. Teniendo en cuenta que las dificultades son de carácter muy profundo, únicamente pueden ser superadas por un cambio drástico de los fundamentos de la teoría, probablemente tan drástico como el paso de la teoría de las órbitas de Bohr a la mecánica cuántica actual.

Dirac nunca se reconcilió con los pragmáticos procedimientos de renormalización. Veamos en este sentido lo que escribió en una fecha tan tardía como 1978 (Dirac 1978: 4-5):

[Los físicos teóricos establecieron] reglas para descartar los infinitos y desarrollar sus ecuaciones en término de cantidades finitas. El descarte podía expresarse como una renormalización de las constantes físicas fundamentales. Los resultados de los cálculos estaban bien definidos. Sucedió que estaban de acuerdo con la observación.

La mayoría de los físicos están satisfechos con esta situación. Argumentan que si se tienen reglas para efectuar cálculos y los resultados están de acuerdo con la observación, esto es todo lo que se necesita.

Pero esto no es todo lo que se necesita. Se requiere una única teoría abarcadora que se aplique a todos los fenómenos físicos. No una teoría para tratar con efectos no relativistas y una teoría separada y disjunta para tratar con ciertos efectos relativistas.

Más aún, la teoría tiene que basarse en matemáticas correctas, en la que se desprecie únicamente cantidades que son pequeñas. No está permitido despreciar cantidades infinitamente grandes. La idea de renormalización solamente sería adecuada si se aplicase a factores finitos de renormalización, no a infinitos.

Por estas razones, encuentro a la actual electrodinámica cuántica bastante insatisfactoria. Uno no debería ser complaciente con sus fallos.

En una línea parecida, el propio Dyson (1996: 14) señaló en sus comentarios al libro que contiene una selección de sus artículos: «El método de cálculo que tuvo éxito tan brillantemente como una herramienta práctica, se basaba en cerrar los ojos ante evidentes absurdos matemáticos [...] El método tuvo éxito y proporciona valores finitos para magnitudes observables únicamente en el esquema de una teoría de perturbaciones que asegura que se cancelan los infinitos. Si la electrodinámica cuántica existe como una teoría matemática bien definida, no debería requerir cancelaciones de absurdos y no debería estar restringida a un desarrollo en serie de potencias. Todas las magnitudes que aparecen en las ecuaciones de la electrodinámica cuántica deberían tener un significado matemático preciso, y su comportamiento debería estar descrito por ecuaciones de tal manera que esos absurdos nunca apareciesen».

Pese a las reticencias de Dirac, los trabajos de Dyson fueron recibidos enseguida con alegría, por no decir con alivio, por la comunidad de físicos. Así, Bethe escribía a Peierls desde Ithaca el 2 de febrero de 1949 (Lee 2007: 347):

En mi opinión, Dyson es uno de los mejores físicos teóricos que viven ahora, independientemente de su edad. Probablemente, es el mejor teórico inglés desde Dirac. En este país, le colocaría al mismo nivel que Schwinger, que es catedrático en Harvard y es considerado el mejor teórico de menos de 40 años [...] Durante los últimos cinco meses, Dyson ha reelaborado completamente la teoría de la electrodinámica cuántica de Schwinger. Ha demostrado su identidad

con la teoría de Feynman y ha obtenido una teoría que combina la sólida base de la de Schwinger con la facilidad de cálculo de la teoría de Feynman. Con esta nueva formulación es posible atacar cualquiera de los complicados problemas en no importa qué orden superior y llegar a los resultados en términos de una integral. Además, Dyson ha logrado, junto a Feynman, demostrar que todos los efectos de la electrodinámica son finitos, excepto aquellos que pueden interpretarse como renormalizaciones de la masa o la carga de la partícula. Estarás de acuerdo conmigo en que esto constituye un tremendo avance en la teoría.

Tomonaga, Schwinger y Feynman (la Academia Sueca los nombró en este orden) recibieron el Premio Nobel de Física en 1965, «por su fundamental trabajo en electrodinámica cuántica, con profundas consecuencias en la física de las partículas elementales». Al no permitir las reglas de los Premios Nobel que estos se compartan por más de tres personas, Freeman Dyson, que tanta luz había arrojado sobre lo que esos tres físicos habían hecho, no recibió el reconocimiento que, según algunos, merecía.

LA FÍSICA ESTADOUNIDENSE Y LA TRADICIÓN EMPÍRICA

A lo largo del análisis precedente del establecimiento de la electrodinámica cuántica, hemos comprobado la importancia que tuvieron los trabajos experimentales de Lamb y Retherford por un lado, y de Kusch y Foley por otro. Por cierto, Lamb y Kusch recibieron el Premio Nobel de Física en 1955 —antes, por consiguiente que Feynman, Schwinger y Tomonaga— por «sus descubrimientos relativos a la estructura fina del espectro del hidrógeno» (Lamb) y «su precisa determinación del momento magnético del electrón» (Kusch). Lo que llevó tanto a Schwinger como a Feynman a sus versiones de electrodinámica cuántica fue, sobre todo, la noticia de las medidas de Lamb y Retherford. Este hecho no es circunstancial, sino que revela una característica de la física estadounidense que merece la pena resaltar. El mismo Dyson (1996: 11), que dado su bagaje europeo pudo apreciar mejor que otros tal rasgo, lo expresó de la manera siguiente:

La tradición científica americana era fuertemente empírica. La teoría era considerada un mal necesario, que se necesitaba para comprender correctamente los experimentos, pero que no era valorada en sí misma. La teoría cuántica de campos había sido inventada y elaborada en Europa. Era una sofisticada construcción matemática, motivada más por consideraciones de belleza matemática que por tener éxito explicando experimentos. La mayoría de los físicos americanos no se habían molestado en aprenderla. La consideraban como Samuel Johnson a la ópera italiana, un entretenimiento exótico e irracional.

RICHARD FEYNMAN, PUENTE DE UNIÓN ENTRE LAS DOS MITADES DEL SIGLO XX

El neoyorquino, contemporáneo exacto de Schwinger, Richard Phillips Feynman, como acabamos de ver uno de los creadores de la electrodinámica cuántica, fue para la comunidad internacional de físicos mucho más que eso: fue uno de sus iconos, una figura mítica, tan admirada y respetada como amada. Nos volverá a aparecer en otros capítulos, comenzando por el siguiente, a propósito de su relación con la interacción gravitacional, pero quiero cerrar el presente capítulo extendiéndome algo más sobre su biografía. Lo hago, en primer lugar por el lugar que ocupa en el, dicho metafóricamente, «santoral de los físicos», pero no solo por esto. También porque navegó con fortuna a través de las dos mitades del siglo XX, hasta que un cáncer terminó con su vida, de manera que, en cierto sentido, representa un lazo de unión entre dos periodos importantes para la ciencia.

Obtuvo su grado en física en el Massachusetts Institute of Technology, y su doctorado en la Universidad de Princeton, bajo la dirección de otro físico memorable, aunque no tan genial como su discípulo: John Archibald Wheeler. The Principle of Least Action in Quantum Mechanics se titulaba su tesis doctoral, presentada en 1942.[68] En ella se pueden encontrar los gérmenes de posteriores contribuciones suyas, entre ellas, a la electrodinámica cuántica, pero más aún a la idiosincrásica formulación que produjo de la mecánica cuántica, la denominada «de integrales de caminos», la única formulación de la mecánica cuántica con la que el autor de estas líneas pudo imaginarse que comprendía la mecánica cuántica (entendiendo por esto algo diferente a ser capaz de resolver problemas), formulación que Feynman explicó posteriormente en un libro escrito con un antiguo alumno suyo, Albert Hibbs: Quantum Mechanics and Path Integrals (Feynman y Hibbs 1965).

Junto con Wheeler, Feynman acometió un gran proyecto: intentar desarrollar una electrodinámica de acción a distancia, esto es, en la que no existiesen campos, con el fin último de cuantizarla posteriormente, ya que, suponían, si las divergencias que impedían encontrar una electrodinámica cuántica estaban relacionadas, al menos en parte, con los campos (funciones de infinitas variables) tal vez hallar una electrodinámica clásica sin campos sería un buen

camino para producir la deseada versión cuántica. El proyecto no llegó a buen puerto, pero desde otras perspectivas —dar cabida a ondas avanzadas (esto es, que venían del futuro), junto a las retardadas— tuvo gran interés, y condujeron a dos artículos que se publicaron en dos números muy especiales de la revista de física estadounidense Reviews of Modern Physics: el de abril-julio de 1945, dedicado a celebrar el sesenta cumpleaños de Niels Bohr (Wheeler y Feynman 1945), y el de julio de 1949, que honraba el setenta cumpleaños de Albert Einstein (Wheeler y Feynman 1949).

Además de su excelencia como científico, Feynman fue un hombre al que, utilizando la famosa frase de Publio Terencio Africano, «Homo sum, humani nihil a me alienum puto»; esto es, «Hombre soy, nada de lo humano me es ajeno». Cuando su país lo necesitó, no dudó en dar su tiempo para formar parte del Laboratorio de Los Alamos, el centro del Proyecto Manhattan que se ocupaba de resolver los problemas asociados a la fabricación de bombas atómicas, una vez se dispusiera de los materiales fisionables (uranio y plutonio) necesarios. Son innumerables las historias que compañeros suyos contaron acerca de su buen humor y originalidad durante aquellos años, años duros para él, ya que su esposa estaba muriendo.

Su amor por la física, y su originalidad, se mostraron de muy diversas maneras: fue, por ejemplo y como veremos, pionero en la nanociencia; escribió libros que guiaron a los físicos, no solo a los avezados, también a los que comenzaban su camino o deseaban contemplar esta ciencia desde perspectivas más generales y básicas. Me estoy refiriendo a su famoso curso de física, conocido como Feynman Lectures on Physics, fruto de los cursos que dio a estudiantes del California Institute of Technology entre 1961 y 1963. Se publicó, con la ayuda de Robert Leighton y Matthew Sands, en tres volúmenes y ha sido traducido a una docena de idiomas.

Admirado por sus colegas, y honrado con los mejores honores que se podían ofrecer a un científico, Feynman se convirtió en una figura pública —algo poco frecuente cuando se trata de científicos— cuando, en sus últimos años, en enero de 1986, el presidente Reagan le designó para formar parte de una comisión para investigar la causa de la explosión del transbordador espacial Challenger. En una audiencia televisada del comité, que causó una profunda impresión en millones de telespectadores, Feynman realizó un sencillo experimento con un vaso de agua helada y un trozo de un elemento, en forma de anillo (un retén tórico), del transbordador destruido, para mostrar el origen del desastre. Dos libros que

publicó con la ayuda de Ralph Leighton (hijo de Robert), en los que de manera desenfadada narraba todo tipo de historias, incluyendo las de su actividad en la comisión presidencial, ayudaron a que su fama se extendiese.[69]

Fue, además, un hombre compasivo, como muestra el contenido de una carta que escribió el 3 de febrero de 1966 a un antiguo alumno suyo (que también lo era de Tomonaga), Koichi Mano, en respuesta a la felicitación que este le envió tras el anuncio de que había recibido el Premio Nobel (Feynman 2006: 205-207):

Querido Koichi:

Me alegró mucho recibir noticias suyas, y de que usted tenga ese puesto en los Laboratorios de Investigación.

Por desgracia su carta me preocupa, pues parece que usted está realmente triste. Parece que la influencia de su profesor ha consistido en darle una falsa idea de cuáles son los problemas que valen la pena. Los problemas que valen la pena son los que uno puede realmente resolver o ayudar a resolver, aquellos en los que uno puede aportar algo. Un problema es grande en ciencia si se presenta ante nosotros irresuelto y vemos alguna manera de avanzar en él. Le aconsejaría tomar problemas aún más simples o, como usted dice, más humildes, hasta que encuentre uno que realmente pueda resolver fácilmente, por trivial que sea. Obtendrá el placer del éxito, y de ayudar a su prójimo, incluso si solo se trata de responder a una pregunta en la mente de un colega menos capaz que usted. No debe privarse de estos placeres porque tenga una idea errónea de lo que vale la pena.

Usted me conoció en la cima de mi carrera, cuando según usted yo estaba interesado en problemas próximos a los dioses. Pero al mismo tiempo tenía otro alumno de doctorado (Albert Hibbs) cuya tesis trataba de cómo pueden los vientos formar ondas cuando soplan sobre el agua en la superficie del mar. Le acepté como alumno porque vino a mí con el problema que quería resolver. Con usted cometí un error. Le di el problema, en lugar de que usted encontrase el suyo, y le dejé con una idea equivocada de lo que es interesante o agradable o importante para trabajar (a saber: los problemas en los que usted ve que puede hacer algo). Lo siento, perdóneme. Espero que esta carta ayude a corregirlo un poco.

He trabajado en innumerables problemas que usted calificaría de humildes, pero con los que disfruté y me sentí muy bien porque a veces podía obtener un éxito parcial. Por ejemplo, experimentos sobre los coeficientes de fricción en superficies altamente pulidas para tratar de aprender algo sobre cómo funcionaba la fricción (fracaso). O cómo dependen las propiedades elásticas de los cristales de las fuerzas entre sus átomos, o cómo hacer que el metal galvanizado se adhiera a objetos de plástico (como los botones de una radio). O cómo se difunden los neutrones en el uranio. O la reflexión de ondas electromagnéticas en las láminas que recubren el vidrio. El desarrollo de ondas de choque en explosiones o el diseño de un contador de neutrones. Por qué algunos elementos capturan electrones de órbitas L pero no de órbitas K. La teoría general de cómo doblar un papel para hacer una especie de juguetes infantiles (llamados flexágonos). Los niveles de energía en los núcleos ligeros. La teoría de la turbulencia (le he dedicado varios años sin éxito). Más todos los problemas «mayores» de la teoría cuántica.

Ningún problema es demasiado pequeño o demasiado trivial si realmente podemos hacer algo con él.

Dice usted que es un hombre anónimo. No lo es ni para su mujer ni para su hijo. Tampoco lo será para sus colegas inmediatos si puede responder a sus sencillas preguntas cuando entren en su despacho. Usted no es anónimo para mí. No permanezca anónimo para usted mismo, es una manera demasiado triste de ser. Conozca su lugar en el mundo y valórese justamente, no en términos de los ingenuos ideales de su juventud, no en términos de lo que usted imaginó erróneamente que son los ideales de su profesor.

Mucha suerte y felicidad.

Afectuosamente,

Richard Feynman.

La cita de esta entrañable carta, que nos muestra que la ciencia, que los científicos, no están, no deben estar, al margen de todo aquello que llamamos «humano», es una buena forma de terminar este capítulo.

2

GRAVITACIÓN Y UNIVERSO

Como apunté en el capítulo primero, visto retrospectivamente, parecería que el descubrimiento de la expansión del Universo debido a Hubble impuso solo un modelo cosmológico, el que asumía que en un pasado muy remoto el Universo «nació» o «renació» (en el caso de un posible modelo oscilatorio, con expansiones seguidas de contracciones) mediante una gigantesca explosión, un modelo que se habría mantenido en lo sucesivo sometido, claro está, a mejoras. Sin embargo, nos engañaríamos si pensásemos que semejante modelo terminó la primera mitad del siglo en la posición dominante que tiene en la actualidad, el del Big Bang. Que no fuese así, se debió a varios factores, como problemas en las estimaciones de la edad del Universo y el trabajo de tres físicos, el inglés Fred Hoyle (1915-2001) y los austríacos —instalados en Gran Bretaña— Hermann Bondi (1919-2005) y Thomas Gold (1920-2004), que en 1948 propusieron una alternativa muy diferente: la cosmología del estado estacionario (steady-state cosmology), en la que el Universo no habría tenido principio ni final, una cosmología en la que se asumía el denominado «principio cosmológico perfecto», la tesis de que el Universo presenta, salvo irregularidades locales, el mismo aspecto desde cualquier punto del espacio y en cualquier instante.[70] Como veremos en este capítulo, fue a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, esto es, después de las revoluciones introducidas por la teoría de la relatividad general y las observaciones de Hubble, cuando la visión del Universo se decantó por la existencia en el pasado de un gran estallido.

I

¿UNIVERSO ETERNO O SEMPITERNO? EL NACIMIENTO DE LA RADIOASTRONOMÍA

EL ORIGEN COSMOLÓGICO DEL TIEMPO Y LOS PROBLEMAS DE SU VERIFICACIÓN

En 1948, cuando apareció la teoría del estado estacionario, la cosmología apenas existía como una disciplina unificada, no, al menos, si entendemos por disciplina unificada a la constituida por un campo definido con un conjunto de presuposiciones básicas, métodos y metas comunes. El que existiese la cosmología relativista no quiere decir que hubiese acuerdo sobre qué debía buscar, o para qué servía realmente, la cosmología, entendida como una parte de la física. No es irrelevante recordar que durante décadas una buena parte, acaso la mayoría, de los cosmólogos eran en realidad matemáticos. Incluso se produjeron intentos de basar el estudio del Universo en formulaciones teóricas que no se apartaran tanto de la «física clásica» como la cosmología relativista; intentos del tipo de la relatividad cinemática de Edward Milne, desarrollada durante la década de 1930, la «cosmología newtoniana», en la que se esforzaron, entre otros, William McCrea, Arthur Walker y el propio Milne, o las cosmologías de los «grandes números», de Paul Dirac y Pascual Jordan.[71]

Pero existía un punto que todas esas cosmologías compartían: el Universo se expandía y tenía una edad que, de manera más o menos aproximada, daba el inverso de la constante de Hubble. La mayor parte de las teorías también aceptaban el denominado «principio cosmológico», según el cual las propiedades a gran escala del Universo en cualquier momento son independientes de la situación del observador. Ahora bien, teoría y observación no casaban del todo bien. Por un lado, astrónomos como Hubble no mostraban demasiado interés en la teoría, en los modelos cosmológicos relativistas. Por otro, existía un serio problema relacionado con la edad del Universo: como se indicó en el capítulo precedente, el inverso de la constante de Hubble, 1/H, determinaba la edad del Universo, pero los datos obtenidos por Hubble para la expansión, esto es, el cociente entre la velocidad y la distancia, conducían a que el Universo tenía una edad de, aproximadamente, 1.800 millones de años. De hecho, el propio Hubble defendió que esa edad era menor. Veamos lo que escribió en este sentido (Hubble 1942: 112):

Si las nebulosas están alejándose, y se aplican los factores de oscurecimiento, entonces la escala de distancia se ve alterada, y la ley de los desplazamientos hacia el rojo ya no es lineal. El ritmo de expansión aumenta más y más rápidamente con la distancia. El significado de este resultado se hace claro cuando se da la vuelta a la imagen. La luz que nos llega hoy dejó las distantes nebulosas hace mucho en el oscuro pasado —hace cientos de millones de años. Cuando decimos que el ritmo de expansión del Universo aumenta con la distancia, estamos diciendo que hace mucho, el Universo se estaba expandiendo más rápidamente que ahora; que, durante al menos los últimos millones de años, el ritmo de expansión ha ido disminuyendo. Por consiguiente, la denominada «edad del Universo», el intervalo de tiempo desde que comenzó la expansión es mucho menor que los 1.800 millones de años que sugiere una ley lineal del desplazamiento hacia el rojo. Si las medidas son correctas, el intervalo sería menor que 1.000 millones de años, una fracción de la edad de la Tierra y comparable con la historia de la vida en la Tierra [...] O las medidas no son correctas, o los desplazamientos hacia el rojo no representan la expansión del Universo.

En efecto, desde al menos 1927 se disponía de resultados que mostraban la gran antigüedad de la Tierra; aquel año, el geólogo británico Arthur Holmes publicó The Age of the Earth, an Introduction to Geological Ideas, en el que presentaba un rango de 1.600 a 3.000 millones de años para la edad de la Tierra (Holmes 1927).

En el artículo que estoy citando, Hubble reconocía que existían varias incertidumbres en los datos obtenidos con el telescopio de 2,5 metros, y que afectaban al valor de la constante de Hubble, H. Estas incertidumbres se debían a que «las operaciones son delicadas y los datos más significativos que se encuentran están cerca de los límites de los telescopios más grandes. Bajo semejantes condiciones, siempre es posible que los resultados se vean afectados por errores sistemáticos ocultos [...] En última instancia, el problema se resolverá con el telescopio reflector de 5 metros destinado a Palomar». De hecho, las incertidumbres eran tales que no se podía determinar si el Universo era abierto o cerrado; esto es, si se expandiría indefinidamente o si terminaría empezando a contraerse, posibilidades que la solución de Friedmann-Robertson-Walker permitía.

El origen del telescopio de 5 metros al que se refería Hubble en 1942 se remonta al primer lustro de la década de 1930 cuando, debido a la creciente contaminación lumínica de Los Ángeles, Hale comenzó a buscar posibles emplazamientos para un nuevo telescopio reflector, con un espejo de 5 metros de diámetro. Arizona, Texas, Hawai y Sudamérica fueron algunos de los lugares considerados, pero finalmente se optó por Monte Palomar, 160 kilómetros al sudeste de Pasadena (California). Un primer gran problema era el del material con el que fabricar el espejo: cuanto más grande era el espejo, más le afectaban los problemas de deformación derivados de lograr con cierta rapidez el equilibrio térmico, lo que conducía a distorsiones en las imágenes. Se gastaron 600.000 dólares, sin éxito, con General Electric intentando producir un molde con cuarzo fundido, tras lo cual Hale decidió probar con otro tipo de vidrio, de borosilicato: el Pyrex, desarrollado por Corning Glass Works de Nueva York en 1915.[72]

En 1936, Corning Glass Works terminó la fabricación del espejo «en bruto», enviándolo a Pasadena en un tren especial, que nunca superó los 40 kilómetros de velocidad. Aquel mismo año comenzó la construcción de las instalaciones del observatorio (el domo finalmente tuvo una altura de 41 metros y un diámetro de 42 metros). El pulido del espejo se realizó en el taller de óptica del California Institute of Technology, institución a cuyo cargo quedó el Observatorio. La compleja y lenta tarea de pulido y obtención de la curvatura adecuada, en la que se eliminaron 4.500 kilogramos de vidrio, terminó en 1947. Finalmente, entre el 18 y el 19 de noviembre de 1947, el espejo (de 40 toneladas de peso) se llevó de Pasadena a Monte Palomar. El 3 de julio de 1948, se inauguraba oficialmente, dándosele el nombre de «telescopio Hale». Aquel mismo año, la Carnegie Institution y el California Institute of Technology acordaban agrupar la organización de los observatorios de Monte Wilson y de Monte Palomar bajo el control de un único director científico y administrativo, un arreglo que funcionaría durante tres décadas.

LA COSMOLOGÍA DEL ESTADO ESTACIONARIO

Descritos algunos de los problemas con los que se enfrentaba la cosmología derivada del descubrimiento de la expansión del Universo, es el momento de volver a la cosmología del estado estacionario. Los físicos que la crearon, los ya mencionados Fred Hoyle, Hermann Bondi y Thomas Gold, pertenecieron a la élite de la ciencia del cosmos de su tiempo, llegando algunos a desempeñar también actividades fuera de la investigación científica. Hoyle, un científico de gran versatilidad y originalidad, escribió novelas de ciencia ficción que obtuvieron notable éxito, como The Black Cloud (1957) o A from Andromeda (1962), con John Elliot, además de un buen número de ensayos y libros de divulgación.[73] Por su parte, Bondi se convirtió en uno de los mejores expertos mundiales en la teoría de la relatividad general, creando un grupo en el King's College de Londres; más tarde fue, entre otros cargos, director general (1967-1971) de ESRO (European Space Research Organization), chief scientific adviser (asesor principal en ciencia), primero del Ministerio de Defensa (1971-1977) y luego del Departamento de Energía (1977-1980).[74] En cuanto a Gold —a partir de 1959 en la Universidad de Cornell (Estados Unidos)— trabajó en campos diferentes: astrofísica, biofísica, geofísica e ingeniería aeroespacial, siempre con contribuciones distinguidas.

Existen diferentes versiones sobre cómo llegó este trío a imaginar una cosmología alternativa a la de un universo en expansión. Hoyle manifestó en un programa de televisión de la BBC, de la década de 1970 (According to Hoyle), que la idea surgió en 1946 cuando los tres vieron en Cambridge (donde se conocieron) una película titulada The Death of Night, en la que el final coincide con el principio, como la pescadilla que se muerde la cola y que, dieciséis meses después, más concretamente el 10 de febrero de 1948 consiguió dar expresión matemática a la idea de creación de materia que exigía un universo sin principio ni final (una variante de final que coincide con el principio). Según esa historia, la película inspiró a Gold a sugerir que acaso el Universo no cambiase aunque sí fuese dinámico.

En sus memorias, Bondi (1990: 64-65) fue más preciso, no coincidiendo siempre con lo que Hoyle recordaba. Primero mencionaba los problemas que la teoría de la expansión del Universo planteaba con relación a las escalas temporales

cósmica y terrestre, que «producía una atmósfera opresiva durante las décadas de 1930 y 1940». Y a continuación escribía:

Ello condujo a una gran actividad de enfoques heterodoxos de la cosmología, como los debidos a Milne y Dirac, así como a esfuerzos más ortodoxos asociados con Eddington, Lemaître y Gamow. Hoyle, Gold y yo habíamos discutido estos asuntos, entre otros, en muchas ocasiones. Pero fue, creo, en la segunda mitad de 1947, cuando Tommy Gold dio con la idea de la creación continua y el estado estacionario. Fred y yo pensamos que era una idea absurda que podríamos descartar antes de cenar. ¡La cena llegó bastante tarde aquella noche! Muy pronto encontramos que no solo no podíamos descartar la idea, sino que solucionaba muchos otros problemas [...] Además, a Tommy y a mí, acaso un poco más interesados en la filosofía que Fred, nos interesó lo deseable que era esta teoría desde el punto de vista lógico. Según los criterios de Popper, cuanto más vulnerable fuera una teoría, mejor era, ya que suministraba un mayor número de resultados que podían ser sometidos a prueba. La teoría del estado estacionario no podía refugiarse en explicar cualquier inconsistencia refiriéndose a cambios en, por ejemplo, la naturaleza de las galaxias entre los tiempos pasados y los actuales. De acuerdo con la teoría, todo lo que sucedió en cualquier lugar en cualquier instante debe suceder también ahora. Por consiguiente, nuestra teoría proporcionaba una imagen más bella y predictiva que todas las propuestas hasta entonces.

Más de sesenta años después de que Bondi, Gold y Hoyle pensasen en semejantes términos —que la cosmología del estado estacionario era más «razonable» desde el punto de vista lógico y estético— y ya con la cosmología del Big Bang firmemente establecida, puede resultar difícil entender las afirmaciones de Bondi, pero no darse cuenta de que efectivamente era razonable pensar así, no es sino una manifestación más de uno de los grandes pecados que se pueden cometer al intentar reconstruir el pasado: llevar a tiempos pretéritos las ideas y conocimientos que ahora poseemos. La idea de la cosmología del estado estacionario no era absurda —no más que aceptar la idea de que existió un momento en el que se «creó» el Universo—, resolvía algunos problemas y, como veremos, fue aceptada por muchos.

Un punto importante que aún no he mencionado es que al aceptar los resultados observacionales de Hubble, esto es, que el Universo se expande, la cosmología del estado estacionario tenía que asumir una hipótesis «fuerte»: la creación de materia. El motivo es fácil de entender: supongamos un gran cubo cósmico, con una cierta densidad media de materia en un momento determinado; lo que dice la cosmología estacionaria, el principio cosmológico perfecto, es que esa densidad media deberá ser la misma en el pasado y en el futuro, pero si el Universo se expande entonces esa materia se va alejando y el cubo cósmico en cuestión se irá vaciando... salvo que se cree materia que mantenga constante la densidad media. En un libro escrito por Bondi no mucho después de establecer su teoría, en el que repasaba la situación de la cosmología (1952: 143), se puede leer: «No hay duda de que la creación continua de materia necesaria en esta teoría constituye el cambio más revolucionario que propone». Y a continuación añadía: «Sin embargo, no existe ninguna evidencia observacional que contradiga el ritmo de creación continua que exige el principio cosmológico perfecto. Es fácil ver que este es, de media, aproximadamente

$$3\times(\text{densidad media de la materia en el Universo})\times$$

$$\text{constante de Hubble} = 10\text{-}43\ \text{g/cm}^3\cdot\text{seg.}$$

En otras palabras, de media, se crea la masa de un átomo de hidrógeno por cada litro de volumen cada 10^9 años». El equivalente era, en consecuencia, unos tres nuevos átomos de hidrógeno por metro cúbico por millón de años.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que por entonces (1946-48), la idea de creación de materia no era algo tan sorprendente como se podría imaginar: la electrodinámica cuántica, sobre la que se venía trabajando desde el artículo pionero que Paul Dirac publicó en 1927, incluía la polarización del vacío; esto es, la creación de pares partícula-antipartícula durante el tiempo permitido por el principio de indeterminación de Heisenberg aplicado a la energía y al tiempo: $\Delta E\cdot\Delta t\geq h$. Por otra parte, existían antecedentes a la idea de creación de materia, como el propio Hoyle (1948: 372) señalaba en el artículo en el que presentó su versión, y al que enseguida me referiré:

La creación de materia fue mencionada hace unos veinte años por Jeans [Astronomy and Cosmogony (Cambridge University Press 1928), p. 352] que señaló:

«El tipo de conjetura que se presenta a sí misma, de manera bastante insistente, es el de que los centros de las nebulosas (galaxias) tienen la naturaleza de puntos singulares, en los que la materia penetra en nuestro Universo desde otra y completamente extraña dimensión espacial, de forma que, a un habitante de nuestro Universo, aparezcan como puntos en los que la materia se crea continuamente». Desarrollos subsiguientes han ofrecido, sin embargo, poco apoyo a esta forma particular de creación.

Más recientemente, Dirac [Nature 139, 323 (1937)] ha señalado que la creación continua de materia puede relacionarse con cuestiones cosmológicas más amplias.

Por último, en un modelo explosivo (Big Bang) también existía, por supuesto, creación de materia, en el instante inicial de la explosión. Como señaló Gold en una de las discusiones que tuvieron lugar en la conferencia que sobre el papel de la gravitación en la física se celebró en la Universidad de North Carolina en enero de 1957 (DeWitt, ed. 1957: 52): «Si se niega la creación en el presente, no se puede mantener para el pasado; y esta cuestión no se puede evitar en ninguna teoría».

La presentación «oficial» de la cosmología del estado estacionario se produjo mediante dos artículos, publicados ambos en las Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, uno firmado por Bondi y Gold (1948) y el otro, en solitario, por Hoyle (1948). A pesar de sus evidentes diferencias (más matemático el de Hoyle —que desarrolló una teoría de campos, relacionada con la relatividad general, pero introduciendo un nuevo campo, C, responsable de la creación de materia y ajustando su valor para que la teoría fuese consistente con la ley de Hubble—, más discursivo el de Bondi y Gold), los artículos en que se presentaron ambas versiones se caracterizaban por incluir objeciones de tipo filosófico a la cosmología estándar (de Friedmann-Robertson-Walker). Así, Hoyle (1948: 372) escribía que la cosmología estándar estaba «contra el espíritu de la indagación científica» porque «consideraba efectos observables como surgiendo de «causas desconocidas a la ciencia», que era lo que «en principio

implicaba la creación en el pasado». Otro punto común es que los tres argumentaban que solamente en un universo de estado estacionario existe alguna base para suponer que las leyes de la física son constantes.

Algunos puntos de vista de Bondi y Gold eran muy diferentes de los de Hoyle, ya que aquellos consideraban la teoría de la relatividad general inaceptable, puesto que en ella se insistía en la conservación de la masa, y no aceptaron el procedimiento introducido por Hoyle con un nuevo campo. Lo que Bondi y Gold buscaban era sustituir la teoría de la relatividad por una formulación que incluyese, o representase, el denominado principio de Mach, según el cual (o, al menos, de una de sus expresiones) la inercia de la masa de un cuerpo es debida al resto de la masa del Universo. Precisamente por su renuncia al soporte que podían proporcionar, aun modificadas, las ecuaciones de la relatividad general, la formulación de Bondi y Gold era cualitativa y, en última instancia, poco precisa, y nunca pudieron llegar a cumplir el deseo que expresaban en el último párrafo de su artículo (Bondi y Gold 1948: 270): «Esperamos presentar pronto en otro artículo una formulación de teoría de campos libre de estas objeciones». Nunca lo harían.

Una pregunta que surge de manera natural es la de cuál fue la recepción dada a la cosmología del estado estacionario. Como cabía esperar, existen ejemplos en ambos sentidos. En el sentido favorable, un caso significativo es el de un joven que con el tiempo se convertiría en uno de los físicos teóricos más famosos del mundo (en 1979, recibió el Premio Nobel de Física, junto a Abdus Salam y Sheldon Glashow): Steven Weinberg. Preguntado en una entrevista (Lightman y Brawer 1990: 452-453) sobre si cuando comenzaba su carrera «tenía alguna preferencia o expectativas sobre en qué tipo de universo podríamos vivir», Weinberg contestó:

[Cuando estaba en la escuela graduada] pensaba que el modelo del estado estacionario de Bondi y Gold, también de Hoyle, era el más atractivo. Había muchas cosas en él que eran atractivas. Entonces no sabía muy bien qué me gustaba de él, pero visto de manera retrospectiva creo que puedo decir qué me gustaba, y es que ofrecía las mayores posibilidades de realizar predicciones concretas. En cualquier otro modelo cosmológico, está la cuestión de las condiciones iniciales. Si se cree en los ahora populares modelos del Big Bang, surgen todo tipo de preguntas acerca de por qué la entropía del Universo es la

que es, y otras del estilo [...] mientras que en el modelo del estado estacionario hay una condición auto-consistente. Si imaginamos que existe algún mecanismo para producir materia en el espacio intergaláctico, entonces esto conducirá de manera natural a la producción de materia a un cierto ritmo. Y entonces se podría imaginar al Universo llegando a una situación de equilibrio en la que se expande de manera lo suficientemente rápida como para que se cree materia en la proporción necesaria para llenar los huecos en el sistema de galaxias en expansión. Esto me resultaba muy atractivo.

Cuando, entre 1959 y 1961, Weinberg comenzó a trabajar en problemas relacionados con la cosmología, leyó Cosmology, el libro de Bondi mencionado anteriormente. «Este libro», recordaba Weinberg en la entrevista mencionada, «me mostró por vez primera que la cosmología no era un tema exclusivo de observadores, sino que había suficiente profundidad matemática en él como para que los teóricos tuvieran algo que aprender y hacer. No conocía la métrica de Robertson-Walker. Pensé que era extraordinario el hecho de que existiese un teorema que decía que todos los universos homogéneos e isótropos tienen esta métrica particular, independientemente de su dinámica. Bondi no explicaba cómo se demuestra ese teorema. No he sido capaz nunca de entender los artículos de Robertson y Walker, así que finalmente desarrollé la demostración yo solo, y se publicó en mi libro de texto». Se refiere, claro está, a su conocido e influyente texto Cosmology and Gravitation (Weinberg 1972).

La atracción que Weinberg sintió por la cosmología del estado estacionario, se transmite incluso a algunos pasajes de su célebre libro, Los tres primeros minutos. En el capítulo 1 de esta obra, y refiriéndose a «la incómoda necesidad de establecer condiciones iniciales, en especial la proporción inicial de mil millones a uno entre los fotones y las partículas elementales», Weinberg (1996: 29) declaraba que él preferiría «una mayor inevitabilidad lógica en la teoría», y que «una teoría alternativa [al modelo actual] que parece filosóficamente mucho más atractiva es el llamado modelo del estado estacionario».

Al contrario que Weinberg, Alan Sandage (1926-2010), uno de los grandes astrónomos del siglo XX, pensaba (Lightman y Brawer 1990: 75):

Para mí estuvo claro desde el principio que el estado estacionario no era correcto. Nunca tuve dudas al respecto, porque al haber sido estudiante de Baade y comprender por tanto la datación de edad de los cúmulos globulares y la relación entre estos y las galaxias elípticas, era evidente que todas las galaxias eran de la misma edad en lo que se refiere a su contenido estelar más antiguo. Y esto no puede ocurrir en un universo de estado estacionario.

Efectivamente, gracias a los trabajos de Walter Baade (1893-1960) y de Alan Sandage (un antiguo doctorando de Baade), se revisó en profundidad el valor de la constante de Hubble, de manera que en la década de 1950 terminó aceptándose que su valor se encontraba entre 10^{10} y $20 \cdot 10^{9}$ años.[75] El primer aldabonazo llegó en 1952, cuando, durante la reunión de la Unión Astronómica Internacional celebrada en Roma, Baade (1952), un astrónomo de origen alemán que en 1931 se unió al personal del Observatorio de Monte Wilson, anunció que había que revisar el valor que Hubble había obtenido para la edad del Universo. Con el telescopio de 2,5 metros pudo fotografiar estrellas individuales en el centro de la galaxia Andrómeda y de las dos galaxias que la acompañan; encontró entonces que existían dos tipos de estrellas azules (más calientes y que se encuentran en los brazos de las galaxias) y rojas (más frías y que se encuentran en el núcleo galáctico), a las que denominó, respectivamente, «Población (o Tipo) I y II». Ahora bien, resulta que las distancias a estrellas y galaxias se habían determinado utilizando únicamente estrellas de la Población I, lo que significaba que las medidas de distancias cósmicas eran incorrectas. Los resultados de Baade condujeron a que la distancia que nos separa de Andrómeda no es, como había especificado Hubble, de 800.000 años-luz, sino cerca de 2 millones de años-luz. El Universo se expandía y, en consecuencia, también aumentaba la edad del Universo, con lo que comenzaba a verse una solución al problema del conflicto entre las escalas temporales cósmica y terrestre.

Sandage, uno de los doce privilegiados astrónomos que podían utilizar el Observatorio de Monte Palomar, se dedicó al extremadamente complicado problema de determinar H; como él mismo señaló (Sandage 1958: 514): «La determinación de H es muy difícil. El problema equivale a medir las distancias a galaxias suficientemente remotas, que muestran un desplazamiento sistemático hacia el rojo mayor que la velocidad media aleatoria de 300 km/s, pero no tan remotas como para que los indicadores de distancia más brillantes se desvanezcan por debajo del límite de las placas y no se puedan detectar». Da

idea, no obstante, de las incertidumbres que aún quedaban el que, en la conclusión de su importante trabajo de 1958, Sandage (1958: 525) únicamente podía decir: «La principal conclusión es que no existe ninguna razón para descartar los modelos explosivos de Universo en base a la evidencia de una escala temporal inadecuada, porque los valores posibles de H se encuentran dentro del rango necesario».

En la segunda edición de su libro Cosmology, publicada en 1960, Bondi reconocía los efectos que estos desarrollos producían en la cosmología. Así, en el capítulo 14 («Situación actual de la cosmología»), que escribió de nuevo, declaraba (Bondi 1960: 165): «La característica más importante de las observaciones recientes ha sido, sin duda alguna, la revisión de la escala de distancias y, con ella, la de la constante de Hubble, realizada por Baade y Sandage. No resulta fácil apreciar ahora el grado en que, durante más de quince años, todo trabajo cosmológico se vio afectado y de hecho oprimido por el valor reducido de la inversa de la constante de Hubble, T ($1{,}8 \cdot 10^9$ años), valor tan confiadamente proclamado como proveniente de la observación. La discrepancia entre T y las edades de la Tierra y las estrellas, denominada «dificultad de la escala de tiempo», tuvo poderosa influencia en la formulación y desarrollo de las teorías cosmológicas, y los efectos de la desaparición de esta influencia no han sido examinados completamente». En otras palabras: la cosmología del estado estacionario tenía problemas. Pero, como veremos enseguida, antes de las manifestaciones citadas de Sandage y de Bondi, habían aparecido otras dificultades para esa cosmología.[76]

DEL RADAR A LA RADIOASTRONOMÍA

La cosmología del estado estacionario comenzó a perder predicamento debido a la consolidación de un nuevo tipo de astronomía, que no se limitaba, como había sucedido durante milenios, a examinar las señales que detectan nuestros ojos («astronomía óptica»), sino que se esforzaba en observar otras zonas del espectro electromagnético. Un problema para esta otra astronomía es que la atmósfera terrestre absorbe una buena parte del espectro electromagnético, la correspondiente a la radiación ultravioleta, rayos X, rayos gamma y parte del infrarrojo; por el contrario, es transparente a las ondas radio, a la luz «visible» y a algunas ondas infrarrojas (las ondas radio, que ocupan uno de los extremos del espectro electromagnético, tienen longitudes de onda de entre pocos centímetros a algunos metros, mientras que los rayos X, que se encuentran en el extremo opuesto del espectro, tienen longitudes de onda unas 10.000 veces más «cortas» que las de la luz visible).[77] A esto se debe que la primera «astronomía no óptica» fuese la radioastronomía. Fue Karl Jansky (1905-1950), un ingeniero eléctrico que trabajaba para los laboratorios Bell, quien demostró que existía un universo «oculto», es decir, pleno de señales más allá de las visibles. En 1932, mientras buscaba posibles fuentes de ruido en emisiones de radio, Jansky (1932, 1933a) detectó emisiones electromagnéticas que alcanzaban su mayor intensidad al apuntar a la constelación de Sagitario, en el centro de la Vía Láctea. A pesar de que la prensa se hizo eco de la noticia (en 1932 The New York Times llegó a incluir en su primera página el hallazgo bajo el encabezamiento de «Nuevas ondas de radio en el centro de la Vía Láctea. Se afirma que el misterioso ruido estático registrado por K. G. Jansky es diferente del rayo cósmico») y de la importancia que retrospectivamente asignamos ahora a tales observaciones, Jansky no continuó explorando las posibilidades que había abierto; al fin y al cabo, el mundo de la investigación fundamental no era el suyo. Tampoco los dos artículos que publicó en los Proceedings of the Institute of Radio Engineers recibieron mucha atención, ni el de carácter general que apareció en Popular Astronomy (Jansky 1933b).[78] Únicamente Fred Whipple y Jesse Greenstein, ambos del Observatorio de Harvard (el primero instructor y el segundo estudiante graduado) mostraron algún interés tras saber del hallazgo de Jansky al leer a finales de 1936 el artículo de Popular Astronomy: elaboraron un tratamiento teórico según el cual el «ruido» que observaba no se podía explicar en base a la radiación solar secundaria producida en la atmósfera terrestre

(Whipple y Greenstein 1937).[79]

Quien sí mostró un intenso y largo interés en el descubrimiento de Jansky fue Grote Reber, un astrónomo amateur y físico, graduado en ingeniería eléctrica por Armour Institute of Technology —posteriormente rebautizado con el nombre de Illinois Institute of Technology— que durante bastante tiempo se mantuvo en gran medida trabajando para diversas compañías de Chicago, entre ellas la Stewart Warner, para la que diseñó receptores de radio.[80] Radioaficionado entusiasta, tras saber del trabajo de Jansky, en cuatro meses (junio-septiembre de 1937) construyó él solo —salvo la ayuda ocasional de un par de hombres—, en el patio trasero de su casa (en Wheaton, Illinois), un radiotelescopio, el primero con forma de disco (de 9,5 metros de diámetro), con el exclusivo propósito de dedicarlo a la investigación astronómica.[81] Los resultados —el primer «radio mapa» de la Vía Láctea, la detección de picos de radiación en la dirección de Sagitario, Cygnus y Casiopea— que publicó en la década de 1940, principalmente en los Proceedings of the Institute of Radio Engineers y en The Astrophysical Journal, atrajeron finalmente la atención de los astrónomos, influyendo en el establecimiento de la radioastronomía como un campo de interés astrofísico.[82] De hecho, Greenstein manifestó que fue Reber quien renovó su interés por la radioastronomía, interés que condujo a la publicación de un influyente artículo en Nature (Greenstein, Henyey y Keenan 1946).[83] Asimismo, en el Observatorio de Monte Wilson, Walter Baade y Rudolph Minkowski comenzaron a realizar observaciones radioastronómicas, pero el comienzo de la Segunda Guerra Mundial detuvo temporalmente estos trabajos. Pese a semejante circunstancia, al igual que para otros campos de la ciencia, de la física en particular, la guerra de 1939-1945 fue buena para la consolidación de la radioastronomía. Uno de los grandes programas científico-tecnológicos de aquella contienda, y del que se ocuparon todos los contendientes, la utilización de ondas de radio para detectar aviones, el radar (acrónimo de radio detection and ranging), aportó técnicas que sirvieron de mucho a la radioastronomía.[84] Es importante señalar este punto, el de lo mucho que debió para su institucionalización la radioastronomía al radar. Pensemos, sin ir más lejos, en los primeros centros que contaron con radiotelescopios: el Laboratorio Australiano de Radiofisica, en Sidney, el Departamento de Física de la Universidad de Manchester, el Laboratorio Cavendish de Cambridge (Inglaterra), el Observatorio de Leiden, el Observatorio de Harvard College, el California Institute of Technology y el nuevo Observatorio Nacional de Radioastronomía de West Virginia. De todos los que iniciaron en centros como los anteriores aquella «revolución silenciosa», la de la radioastronomía, es

obligado recordar en especial a Edward Bowen (Sidney), A. C. Bernard Lovell (Manchester), Martin Ryle (Cambridge) y a Jan H. Oort y Henk van de Hulst (Leiden). Pues bien, de estos los únicos que antes eran realmente astrónomos son Oort y Van de Hulst; los otros tres eran físicos que habían trabajado durante la guerra en los esfuerzos británicos por desarrollar el radar.[85] Ahora bien, incluso en el caso holandés hubo una conexión con el radar. El interés de Van de Hulst en la radioastronomía procedió de Oort, miembro destacado del Observatorio de Leiden (dirigido entonces por Ejnar Hertzsprung) y uno de los grandes astrónomos del siglo XX, que había leído los trabajos de Reber. Hacia 1944, Oort sugirió a Van de Hulst que examinase los mecanismos astrofísicos que podían producir líneas en la zona radio del espectro electromagnético, y este llegó a la conclusión (Van de Hulst 1945) de que se podría detectar una línea de 21 centímetros de longitud de onda procedente del hidrógeno neutro, y como este es el principal componente de la materia interestelar, detectar semejante línea constituiría un importante descubrimiento.[86] Para intentar observar la línea del hidrógeno, recurrieron a la ayuda del Servicio Postal, Telegráfico y Telefónico holandés, que había salvado equipos de radar que los alemanes dejaron en la costa holandesa. La radioastronomía se inició en Leiden con aquellos instrumentos; además, el Servicio Postal holandés permitió a los astrónomos utilizar el laboratorio que tenía en la estación de transmisión de Kootwyk: allí obtuvieron su primer mapa radioastronómico de la Vía Láctea.[87] Pero la dependencia de material fabricado por otros constituyó un serio problema para los radioastrónomos de Leiden; como señaló Oort en una entrevista realizada en 1971: «Holanda se encontraba en una posición bastante mala después de la guerra, no solo por la gran destrucción y porque éramos pobres, sino también porque no habíamos tomado parte en los desarrollos del radar que tuvieron lugar durante la guerra. Por consiguiente, no disponíamos de nada parecido a los expertos que existían en Australia, Inglaterra y Estados Unidos. Nuestra principal ventaja entonces era el gran interés desde el lado astronómico».[88] Efectivamente, la ventaja de Holanda, y de Leiden en particular, era su gran tradición astronómica (recordemos, aparte de los citados, a Jacobus Kapteyn y Willen de Sitter).

Del resto de los centros radioastronómicos mencionados, y antes de pasar al de Cambridge, para retomar así el tema de la cosmología del estado estacionario, diré que el punto de partida del Observatorio de Harvard College tuvo lugar en 1952, cuando contrataron a un físico para que construyese un radiotelescopio, mientras que Caltech reclutó a un radiofísico australiano para que hiciera lo mismo en Monte Wilson. En cuanto al Observatorio Nacional de

Radioastronomía estadounidense, un momento central en sus orígenes fue cuando en enero de 1954 Jesse Greenstein organizó una conferencia, patrocinada por Caltech y la Carnegie Institution, para considerar «los intereses nacionales en radioastronomía», en concreto «planes para un gran laboratorio en este campo».[89] El resultado fue un acuerdo mediante el cual un consorcio de universidades, representado por la Associated Universities, Inc., se encargaría de controlar el observatorio, que se construiría con financiación procedente de la National Science Foundation (en 1957, la Fundación recibió de fondos federales 4,5 millones de dólares para «una facilidad Inter-Universitaria de Radioastronomía», que hiciese que Estados Unidos, «cuna de la radioastronomía», «no quedase muy retrasada detrás de otras naciones», como Australia e Inglaterra, «que estaban construyendo radiotelescopios gigantes»).[90] El lugar seleccionado fue Green Bank, en West Virginia. El primer radiotelescopio, un disco parabólico de 26 metros de radio, se completó en 1959, el segundo (un paraboloide de 91,5 metros) en 1962, y un tercero —el que se pensó inicialmente— en 1965 (42,5 metros). En la actualidad, el Observatorio alberga un radiotelescopio de 100 metros de diámetro, que vio la primera luz en agosto de 2000.

Con respecto a Manchester, el personaje clave fue Bernard Lovell (1913-2012). Miembro del Departamento de Física de la Universidad de Manchester desde 1936, siguiendo uno de los intereses del director del Departamento, Patrick Blackett, se dedicaba al estudio de los rayos cósmicos. Como ya se apuntó con anterioridad, durante la guerra Lovell trabajó en el radar, en el Telecommunications Research Establishment (más tarde bautizado como Royal Radar Establishment); inmediatamente después del final de la guerra, en 1945, instaló un equipo de radar prestado por el Anti-Aircraft Command en un patio de la Universidad de Manchester, dedicándose al principio a estudiar si se podía detectar el paso de rayos cósmicos. Sin embargo, debido a las interferencias eléctricas tuvo que abandonar aquel emplazamiento y trasladar todo a Jodrell Bank, en Cheshire, a poco más de 30 kilómetros de Manchester y cerca de la Estación Botánica que mantenía allí la Universidad de Manchester. Observaciones realizadas en diciembre de 1945 llevaron a la conclusión de que los abundantes ecos detectados no se debían al paso por la atmósfera de rayos cósmicos. No por ello abandonó aquel campo: en 1947 disponía de una antena de 66,5 metros, entonces la mayor del mundo, con la que detectaron ruidos de radio procedentes de la Gran Nebulosa de Andrómeda, la primera señal de este tipo observada de una fuente conocida, así como los restos de una supernova, la que observó y estudió en 1572 Tycho Brahe. Al comenzar la década de 1950, y

gracias a la generosa ayuda del Departamento de Investigación Científica e Industrial, Jodrell Bank era ya un centro radioastronómico bien dotado.[91]

Finalmente, Australia. Allí, el establecimiento temprano de la radioastronomía también estuvo ligado al radar. Sus orígenes, en efecto, están ligados al Laboratorio de Radiofísica, centro dependiente de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, la agencia australiana (fundada en 1926) encargada de la investigación científica; el Laboratorio había sido creado en 1939 con el propósito de desarrollar radares para el Ejército, Marina y Aviación australianas, y más tarde también para las fuerzas estadounidenses en el Pacífico sudoeste. La conexión con lo que se estaba haciendo entonces en Gran Bretaña, la metrópoli de la Commonwealth, eran estrechas; de hecho, uno de los científicos que trabajaron en Australia, y que posteriormente se convirtió en el principal impulsor de la radioastronomía en ese país, Edward Bowen, era galés y se había doctorado en el King's College de Londres. En 1935, Bowen comenzó a trabajar en los programas británicos para desarrollar el radar, y al comenzar la guerra se dedicó al problema de detectar submarinos con radares. En 1940 se trasladó a Estados Unidos como miembro de la denominada «Misión Tizard» (por Henri Tizard, el químico que dirigía entonces el Comité de Investigación Aeronáutica), destinada a obtener los recursos industriales y técnicos necesarios para explotar en el ámbito militar los conocimientos científicos generados en Gran Bretaña. A finales de 1943, con la parte principal de la Misión Tizard completada, y la inminente invasión aliada de Europa, Bowen fue invitado al Laboratorio de Radiofísica del CSIRO en Australia, del que fue nombrado director en mayo de 1946. Desde aquella influyente posición, estimuló la radioastronomía de diversas maneras. Una de ellas, y no pequeña, fue reclutando a un joven graduado de la Universidad de Cambridge, John Bolton, que también había trabajado en el radar para la Armada Británica, siendo destinado a la Flota del Pacífico y que, al final de la guerra, decidió quedarse en Australia, convirtiéndose en otra de las grandes figuras de la radioastronomía australiana y mundial. Otro servicio de Bowen fue lograr que se construyese en Parkes, Nueva Gales del Sur, un radiotelescopio con un disco de 64 metros. Se inauguró, con ayuda económica procedente de Estados Unidos, en 1961.[92]

De manera que en la década de 1960 ya estaban en funcionamiento radiotelescopios en Australia, Inglaterra, Holanda y Estados Unidos, que estudiaban el Universo en formas completamente diferentes a las propias de la astronomía óptica. Gracias a estos nuevos instrumentos, astrónomos o expertos en electrónica, ambos convertidos en radioastrónomos, descubrieron la

estructura espiral de nuestra galaxia, la Vía Láctea, objetos cósmicos insospechados como los cuásares y detectaron una «radiación fósil», la radiación de fondo de microondas, que apoyaba la teoría del Big Bang.

En cuanto a la astronomía de rayos X, tardó más en comenzar: las primeras fuentes cósmicas de rayos X se descubrieron accidentalmente en 1962, cuando tres científicos de American Science and Engineering, Inc. (Cambridge, Massachusetts) y uno del MIT detectaron emisiones de rayos X procedentes de fuera del Sistema Solar (Giacconi, Gursky, Paolini y Rossi 1962). Para su experimento utilizaron un cohete Aerobe, que formaba parte de las investigaciones encaminadas a preparar el programa espacial Apollo (se pretendía buscar rayos X procedentes de la Luna).[93] Fue precisamente gracias a que el cohete alcanzaba alturas en las que la atmósfera ya era muy poco, o nada, efectiva absorbiendo esta radiación, cómo se pudo detectar los rayos X. La lección es clara: el desarrollo —la propia existencia más bien— de la astronomía de rayos X, infrarroja y ultravioleta necesita del avance tecnológico aplicado a la exploración espacial, caso este estrechamente relacionado con el mundo de la política, las fuerzas armadas y las telecomunicaciones.

Y ahora ya sí, pasemos a la radioastronomía en Cambridge y a cómo los resultados allí obtenidos afectaron a la cosmología del estado estacionario.

LA RADIOASTRONOMÍA Y LA COSMOLOGÍA DEL ESTADO ESTACIONARIO

Como ya he señalado, uno de los primeros lugares en los que floreció institucionalmente la radioastronomía fue en Cambridge (Inglaterra). Fue allí donde Martin Ryle (1918-1984), continuó decididamente por la senda abierta por Jansky. Como también he apuntado, en semejante tarea se vio ayudado por los conocimientos que había obtenido durante la Segunda Guerra Mundial (al igual que Lovell, trabajó entonces en el Telecommunications Research Establishment gubernamental), así como por la mejora que esa conflagración había significado para la instrumentación electrónica. Utilizando primero (en 1945) antenas y luego (en 1946) dos reflectores parabólicos de 7,5 metros de diámetro, separados 280 metros (lo que se denomina un «interferómetro»), se mejoraron notablemente la posición de las radiofuentes. Con estos instrumentos, en 1950 los radioastrónomos de Cambridge produjeron un primer «mapa» (el «1C») de 50 radiofuentes (Ryle, Smith y Elsmore 1950), un número que aumentaron radicalmente cinco años más tarde, cuando llegaron (el «2C») a las 2.000 (Ryle, Shakeshaft, Baldwin, Elsmore et al. 1955; Ryle y Scheuer 1955). Uno de los hallazgos importantes de Ryle fue el descubrimiento de una radiofuente en la constelación de Cygnus, situada a 500 años-luz de la Vía Láctea: veía de esta manera más lejos en el espacio y, por tanto, también más atrás en el tiempo (las señales que recibía habían sido emitidas largo tiempo atrás, el tiempo que les había costado llegar a la Tierra). Pero el resultado de Ryle y su grupo que interesa resaltar ahora son las observaciones con radiofuentes, con sus curvas «log N-log I» (N=número de radio-estrellas por unidad de ángulo sólido, que tienen una intensidad superior a un cierto valor I), que le llevaron a manifestar que no lograba dar con la «forma en que las observaciones se pudiesen explicar en términos de la teoría del estado estacionario» (Ryle 1955). Lo que, con otras palabras, Ryle y su equipo encontraron es que las radiogalaxias no se distribuían de manera uniforme en el espacio: cuanto más distantes estaban, más abundantes eran, lo que significaba que la densidad de radiogalaxias era mayor en el pasado, contradiciendo la tesis de la cosmología del estado estacionario de que la materia se distribuye de forma uniforme a través del espacio y el tiempo.

Sin embargo, los resultados del grupo de Ryle fueron recibidos con precaución. En una importante conferencia en la Universidad de North Carolina, Chapel Hill,

en enero de 1957, Edward Lilley (1957: 55-57), del Laboratorio de Investigación Naval, de Washington D.C., señalaba que las observaciones de Ryle y Scheuer «sugieren cambios con respecto a un universo isótropo y uniforme, y los resultados, si es que son válidos, no son consistentes con un universo de estado estacionario. Sin embargo, la interpretación de esta curva [log N-log I] ha sido discutida por Bolton, que ha sugerido que cuando existen errores observacionales que aumentan al decrecer la intensidad, incluso una distribución isótropa puede producir una curva de la forma dada» por Ryle y Scheuer. Uno de los problemas surgía porque las zonas de observación de ingleses y australianos eran, evidentemente, muy diferentes (hemisferio norte frente a hemisferio sur).

Seis años más tarde, esto es en 1963, el conflicto todavía no había sido resuelto, especialmente para los físicos y astrofísicos británicos, y William McCrea (1963: 187-188) podía manifestar en su conferencia presidencial en la Royal Astronomical Society que: «M. Ryle y sus colegas no mostraban casi ninguna duda de que sus rastreos de radio alcanzaban mucho más lejos en el Universo de lo que se consigue con los medios ópticos actuales. El primero de sus rastreos entra en gran conflicto con el modelo del estado estacionario. El conflicto de los rastreos más recientes es menos violento, pero todavía es claro. Rastreos ópticos recientes parecen en conjunto entrar en contradicción, pero el conflicto probablemente no está fuera de los límites de incertidumbre de las observaciones. De hecho, la imagen general es que los resultados observacionales que de vez en cuando muestran un gran conflicto con el modelo del estado estacionario, en general tienen que ser revisados, y la revisión habitualmente parece reducir el conflicto; por lo demás, el conjunto de la situación no es concluyente». En otras palabras: existían problemas para la cosmología del estado estacionario, pero no eran concluyentes.

Aparte de la incertidumbre de los resultados radioastronómicos, existía otro problema: las malas relaciones entre Hoyle y Ryle, los dos, por cierto, científicos prominentes del Laboratorio Cavendish de Cambridge. En su autobiografía, Hoyle (1994: 269-271) dató el origen de sus problemas con Ryle después de un seminario que tuvo lugar en el University College de Londres, en 1951, en el que también participó Gold. Parece que Ryle reaccionó grosera y agresivamente ante un comentario (correcto a la postre) sobre radiofuentes, y de ahí, según Hoyle, surgió la enemistad: «No creo que sea irrazonable decir que la motivación de Ryle para desarrollar un programa de contar radiofuentes, un programa que iba a ocupar la mayor parte del tiempo de su grupo durante los siguientes diez años, fue la venganza de su humillación por el asunto de las radiofuentes. Esto iba a

llevarse a cabo rebatiendo la nueva forma de cosmología con la que Gold, Bondi y yo estábamos asociados». De una forma aún más ruda, en el transcurso de una conferencia de prensa que tuvo lugar en Italia en 1988, Hoyle (citado en Smoot y Davidson 1994: 100-101) manifestó: «Aproximadamente desde 1955, Ryle tenía la idea de que contando fuentes de radio en función de sus flujos podía refutar la teoría del estado estacionario. Su programa, que prosiguió incansablemente durante años, no parece haber estado dirigido a otro fin. No se trataba de establecer la cosmología correcta, sino únicamente de refutar las ideas de un colega de la misma universidad, actitud que nunca me pareció merecedora de los aplausos que el mundo científico le brindó. Siempre me asombró el que alguien pudiese creer en Ryle [...] La única explicación razonable que puedo ofrecer es que sus afirmaciones fueron consideradas culturalmente deseables».

No es tan fácil, sin embargo, adjudicar el papel de «malo» a Ryle: salvo en algunos periodos de su vida, Hoyle se caracterizó por mostrar un extraordinario apego a la cosmología del estado estacionario, produciendo a partir de 1961 reelaboraciones con su estudiante Jayant Narlikar; no solo trató de explicar los resultados observados en la distribución de radiofuentes, sino también el más decisivo del fondo de radiación de microondas.[94] No hay que olvidar tampoco que, en 1974, la Academia Sueca de Ciencias reconoció «las investigaciones pioneras en astrofísica, sus observaciones e inventos, en particular la técnica de síntesis de apertura» de Ryle. Por cierto, compartió el Premio Nobel con Anthony Hewish, «por su papel decisivo en el descubrimiento de los púlsares», un honor que Hoyle, al igual que otros, criticó duramente por excluir a Jocelyn Bell, estudiante de Hewish, que fue, como veremos más adelante, quien realizó las observaciones decisivas.

INTERLUDIO: LAS TELECOMUNICACIONES, LA GUERRA FRÍA Y EL «SPUTNIK»

Antes de proseguir con los avances de la cosmología, y para situar en un contexto adecuado el paso decisivo en la consolidación de la cosmología del Big Bang y el abandono mayoritario de la cosmología del estado estacionario —esto es, antes de pasar al descubrimiento del fondo de radiación de microondas—, quiero tratar el desarrollo de las telecomunicaciones en las décadas de 1950 y 1960, desde un punto de vista en el que se resalta su dimensión no solo comercial, sino también política, o, por decirlo de otra manera, insertándolo en el mundo de la Guerra Fría.

Aunque la forma en que terminaron los desarrollos científicos, con las explosiones de bombas nucleares, parecieran indicar lo contrario, la realidad es que las ciencias y tecnologías que más influyeron en la Segunda Guerra Mundial fueron las relacionadas con la electrónica y la aviación. El extraordinario papel que ambas desempeñaron durante la guerra, junto a la nueva fuente de energía que era la nuclear, fue una lección que los militares y gobernantes no habían olvidado, más aún tras el estallido de la guerra de Corea, y, en general, el inicio de la Guerra Fría que enfrentó a las dos superpotencias, Estados Unidos y la Unión Soviética. En la nación norteamericana, por ejemplo, el presupuesto del Departamento de Defensa para Investigación y Desarrollo (I+D) creció extraordinariamente, llegando a 1.300 millones de dólares en 1951. Y no solo es que hubiese más dinero para la investigación, sino que también el clima que produjo tales acontecimientos hizo que desapareciesen algunas resistencias a colaborar con las fuerzas armadas.[95]

La electrónica, una disciplina científica que penetra actualmente en prácticamente todos los resortes de la vida, al igual que en las actividades militares, tomó un protagonismo especial.[96] Si nos fijamos en Estados Unidos, un buen barómetro tanto a efectos de avances científico-tecnológicos, nivel de vida y dimensión militar, el hecho es que en 1941 45 fabricantes de equipos de radio alcanzaban una cifra de ventas de 240 millones de dólares; muy poco después, en 1944, la industria de la radio y el radar llegaba a los 4.500 millones (Forman 1987). Y en la posguerra, la industria electrónica creció a un ritmo aún mayor, cuatro o cinco veces más rápido que el resto de la industria, doblándose

el volumen total de ventas entre 1950 y 1960: a finales de 1959, la revista Electronics estimaba el total de ventas de la industria electrónica, sumando los campos civil y militar, en 10.000 millones de dólares. «La producción electrónica», afirmaba el gerente de la misma revista «había experimentado una metamorfosis única en la historia industrial». En efecto, la industria electrónica ya no giraba en torno a la radio, como sucedía en 1930, cuando el 90 por ciento de las ventas de 103 millones de dólares procedían de la radio; con la llegada de la televisión, y la creciente aplicación de la electrónica en múltiples industrias, en particular en el mercado militar, en 1950 el porcentaje había disminuido al 20 por ciento.[97]

Pero para entender la «explosión electrónica» es necesario tener en cuenta no solo los intereses militares, aunque estos fueron, ciertamente, grandes. Inmediatamente después del final de la guerra, se produjo una gran demanda de equipos de radio y de piezas para reparaciones, debido a que hasta entonces la producción para usos civiles había estado muy restringida. Por ejemplo, se vendieron en Estados Unidos alrededor de 400 millones de válvulas receptoras en 1950, mientras que en 1940 las ventas habían sido de 115 millones. Y en cuanto a las televisiones, de una demanda muy limitada inmediatamente después de la guerra, las ventas pasaron a significar 1.350 millones de dólares en 1950, año en que se fabricaron unos 7 millones de equipos, estimándose en 8 millones las de las radios. (En el Reino Unido, en 1947 había solamente 34.000 televisores, pero ya eran 2 millones en 1953).[98] Ahora bien, este crecimiento «civil» de la industria electrónica estadounidense no continuó al mismo ritmo; cuando se examina de cerca, se encuentra (Forman 1987) que entre 1950 y 1960 las ventas anuales de los productos electrónicos destinados al público apenas aumentaron, mientras que las de productos electrónicos para los servicios militares crecieron un 650 por ciento (en dólares constantes). Y si se consideran las contribuciones al I+D, se encuentra que hacia 1960 el 70 por ciento de la investigación y desarrollo en la industria electrónica se pagaba con fondos federales. Entre 1954 y 1959, la proporción de equipos electrónicos que compraron las Fuerzas Armadas estadounidenses se duplicó, ayudando así a la industria electrónica a superar la recesión que se produjo a mediados de aquella década. De hecho, como señaló Paul Forman (1987: 152) citando una frase del físico del MIT e influyente asesor en políticas científicas Jerrold Zacharias, la Segunda Guerra Mundial «cambió la naturaleza de lo que significa hacer ciencia y alteró de manera radical la relación entre la ciencia y el gobierno... los militares... y la industria».

En medio de aquella revolución electrónica, el 4 de octubre de 1957 la Unión Soviética ponía en órbita alrededor de la Tierra un satélite, el Sputnik, el término ruso para «compañero de viaje».[99] Dos horas después de que hubiese completado con éxito su primera órbita a la Tierra, la agencia soviética de noticias, TASS, comenzó a comunicar detalles al mundo. El Sputnik, decía TASS, estaba girando en torno a la Tierra en una órbita de 95 minutos, a una altura de unos 900 kilómetros, viajando aproximadamente a 28.800 kilómetros por hora. El satélite era una esfera de 58 centímetros de diámetro y un peso de 84 kilogramos.[100] Enviaba señales continuas de radio a la Tierra desde dos transmisores.

James Killian (1977: 7), presidente del MIT, que no tardaría en convertirse en asesor para ciencia y tecnología (1957-1959) del presidente Dwight Eisenhower, se refirió a la reacción que se produjo en Estados Unidos tras el anuncio del logro soviético:

Al lanzar sus señales al espacio, el Sputnik I creó una crisis de confianza que barrió el país como el viento huracanado del incendio de un bosque. De la noche a la mañana, se desarrolló un amplio temor a que el país se encontrase a merced de la maquinaría militar soviética y que nuestro gobierno y su brazo militar hubiese perdido repentinamente el poder de defender a la propia patria, por no decir la capacidad de mantener el prestigio y liderazgo de Estados Unidos en el escenario internacional. De repente, se evaporó la confianza en la ciencia, tecnología y educación americanas.

Por su parte, Eisenhower —había llegado a la presidencia en 1953—, que tenía información secreta sobre los avances que los militares norteamericanos estaban llevando a cabo en el desarrollo de cohetes, así como sobre los progresos rusos obtenidos por los ilegales y ultra-secretos vuelos de los U-2 sobre territorio soviético, inicialmente no estaba tan preocupado, pero pronto se dio cuenta de cuál era la reacción pública y de que, por consiguiente, tenía que actuar. «Este hecho», escribió (Eisenhower 1963: 205), «precipitó una ola de aprensión a lo largo del mundo libre. Comentaristas de periódicos, revistas, radio y televisión se unieron al hombre de la calle en expresiones de desaliento ante esta prueba de que los rusos ya no podían ser considerados como «retrasados» y que incluso

habían «batido» a los Estados Unidos en una espectacular competición científica. Ahora la gente se acordaba con preocupación de que escasas semanas antes la Unión Soviética había anunciado al mundo su primera prueba con éxito de un ICBM [InterContinental Ballistic Missile] de varias fases, un logro que, decían los soviéticos, demostraba que podían lanzar un misil "a cualquier parte del mundo"».

Once días después del lanzamiento del Sputnik, el 15 de octubre de 1957, Eisenhower llamó a la Casa Blanca a los miembros de un grupo asesor que su antecesor en la presidencia —Truman— había creado en 1951, el Science Advisory Committee (SAC; Comité Asesor para Ciencia), para pedirles que evaluasen los programas espaciales y de defensa, y para que le aconsejasen sobre cómo reforzar la ciencia y tecnología estadounidenses.[101] Poco después, el 7 de noviembre, Eisenhower anunciaba la designación de Killian para el nuevo puesto de Asesor del Presidente para Ciencia y Tecnología, y que el ya existente Comité Científico de la Oficina de Movilización para la Defensa sería ampliado, pasando a depender de la Casa Blanca. El 1 de diciembre de ese año, este Comité había sido reorganizado con Killian como chairman y bautizado como Comité Asesor para Ciencia del Presidente. Estaba formado por 22 miembros, entre los que se encontraban algunos de los físicos, químicos e ingenieros más destacados de la nación (como Hans Bethe, George B. Kistiakowsky, Edwin Land, Edward M. Purcell, H. P. Robertson, Jerome Wiesner —que ocuparía el puesto de Killian con el presidente Kennedy—, Herbert York y Jerrold Zacharias).

Aparte de esta reorganización de la asesoría científica gubernamental, el lanzamiento del Sputnik se plasmó también en un importante crecimiento del dinero que tanto el Congreso como el Presidente estuvieron dispuestos, a partir de entonces, a dedicar a la investigación científica. Pocos días después de que llegasen las noticias de la existencia del vehículo espacial soviético, el nuevo secretario de Defensa (que había tomado posesión del cargo el 9 de octubre de 1957), Neil McElroy, anuló la orden de su predecesor de reducir en un 10 por ciento el presupuesto de Defensa para investigación básica. Entre 1957 y 1961, los gastos federales para I+D se multiplicaron por más de dos, llegando a los 9.000 millones de dólares anuales; en concreto, el presupuesto para la National Science Foundation, la institución federal dedicada a promover la investigación básica, pasó de 30 millones de dólares a 76.

Otra consecuencia —muy importante, de larga vida y con profundas

implicaciones para el desarrollo de las ciencias y técnicas espaciales, en Estados Unidos y en todo el mundo— del lanzamiento del Sputnik fue el establecimiento, en 1958, de la National Aeronautics and Space Administration, la NASA.

El 2 de abril de ese año, Eisenhower declaró que era preciso crear una agencia espacial nacional. Ayudado por su Comité Asesor en Ciencia y por la Oficina de Presupuestos, la Administración introdujo la legislación oportuna para crear esta organización espacial, utilizando para ello la difusa y mal organizada red de laboratorios que controlaba el antiguo National Advisory Committee for Aeronautics (NACA).[102] El Senado quiso conservar en la NASA el papel que los militares habían desempeñado en el NACA, pero Eisenhower se mantuvo firme en su idea de que prevaleciese un liderazgo civil y lo consiguió. El 29 de julio de 1958, firmaba la ley por la que se creaba formalmente. En esta ley se lee «El Congreso declara que el bienestar y seguridad general de Estados Unidos requieren que se tomen las medidas oportunas para las actividades aeronáuticas y espaciales. El Congreso declara además, que tales actividades serán la responsabilidad de, y serán dirigidas por, una agencia civil que controle las actividades aeronáuticas y espaciales promovidas por Estados Unidos, excepto en el caso de actividades pertinentes o asociadas primariamente con el desarrollo de sistemas de armamento, operaciones militares o la defensa de Estados Unidos (incluyendo la investigación y desarrollo pertinentes para tomar las medidas necesarias para la defensa de Estados Unidos), que serán responsabilidad de, o serán dirigidas por, el Departamento de Defensa». Específicamente, se asignaban a la nueva organización las siguientes actividades:

1. La extensión del conocimiento humano de los fenómenos en la atmósfera y en el espacio.

2. La mejora de la utilidad, funcionamiento, velocidad, seguridad y eficiencia de los vehículos aeronáuticos y espaciales.

3. El desarrollo y operación de vehículos capaces de transportar instrumentos, equipo, suministros y organismos vivos en el espacio.

4. La realización de estudios de amplio rango sobre los beneficios potenciales que se pueden obtener, de las oportunidades que surgirán y de los problemas

implicados en la utilización de las actividades aeronáuticas y espaciales para fines pacíficos y científicos.

5. La preservación del papel de Estados Unidos como líder en las ciencias y tecnologías aeronáuticas y espaciales y en la aplicación de estas a la realización de actividades dentro y fuera de la atmósfera.

6. Facilitar a las agencias relacionadas directamente con la defensa nacional los descubrimientos que tengan valor o significado militar, y que tales agencias suministren a la agencia civil establecida para dirigir y controlar las actividades aeronáuticas y espaciales no militares información acerca de los descubrimientos que tengan valor o significado para ella.

7. La cooperación de Estados Unidos con otras naciones y grupos de naciones en los trabajos realizados de acuerdo con la presente Acta y en la aplicación pacífica de los resultados correspondientes; y

8. La utilización más efectiva de los recursos científicos y de ingeniería de Estados Unidos para evitar innecesarias duplicaciones de esfuerzos, instalaciones y equipos.

Era, ciertamente, una ley con amplias pretensiones, en la que, por supuesto, no se descuidaba evitar intromisiones civiles en el mundo militar.

Existe otro documento, «U.S. Policy on Outer Space» («Política de Estados Unidos en el espacio exterior»), adoptado en una reunión conjunta del Consejo de la NASA y del Consejo de Seguridad Nacional que tuvo lugar el 12 de enero de 1960 y que Eisenhower aprobó el 26 de enero, que muestra con claridad otra faceta del establecimiento de la NASA: la de desacreditar la imagen pública internacional del sistema comunista frente al estadounidense. Así, en el punto 4 de este documento se especificaba (Logsdon 1995: 362-363):

Desde un punto de vista político y psicológico, el factor más significativo de los logros soviéticos es que han dado nueva credibilidad a sus declaraciones y fines. Mientras que antes la Unión Soviética no era en general creída, ahora incluso sus más atrevidas manifestaciones son aceptadas sin más, no solamente en el

extranjero sino también en Estados Unidos. Los soviéticos han utilizado esta credibilidad para los siguientes propósitos:

a. Defender la superioridad general del sistema soviético en base a que los Sputniks y Luniks demuestran la habilidad del sistema para producir grandes resultados en un periodo de tiempo extremadamente pequeño.

b. Defender que el balance mundial se ha desplazado a favor del comunismo.

c. Defender que el comunismo es la ola del futuro.

d. Crear una nueva imagen de la Unión Soviética como una poderosa, científicamente refinada nación que es igual a Estados Unidos en la mayor parte de los aspectos, superior en otros y con un futuro mucho más brillante.

e. Crear una nueva imagen militar de la vasta capacidad humana de las naciones comunistas, ahora sustentada por armamento que es científicamente tan avanzado como el de Occidente, superior en el campo de los misiles y en cantidad en todos los campos.

Y en el punto 7:

Para el lego, los vuelos espaciales tripulados y la exploración [espacial] representarán la verdadera conquista del espacio exterior y por consiguiente el fin último de las actividades espaciales. Ningún experimento no tripulado puede sustituir, en su efecto psicológico sobre los pueblos del mundo, a la exploración espacial realizada por personas. No existe razón para creer que los soviéticos, después de lograr un comienzo más temprano, estén dando tanto énfasis en su programa de vuelos espaciales tripulados como Estados Unidos.

En otras palabras: el Gobierno norteamericano entendía que el espacio se había convertido en el escenario preferente en el que se representaba una lucha publicitaria, de imagen, entre los dos sistemas políticos dominantes en el mundo: el comunismo soviético y la democracia capitalista estadounidense.

Importante y conmovedor como fueron los lanzamientos de los dos satélites Sputnik soviéticos, lo que realmente preocupaba a los norteamericanos no era tanto que los soviéticos fuesen capaces de poner satélites en órbita, sino que ello demostraba que poseían cohetes que no solo podían poner en órbita un satélite más o menos pequeño, solo o tripulado, sino que también se podrían utilizar para llevar bombas atómicas, de las que la Unión Soviética disponía desde hacía tiempo (el 29 de agosto de 1949 realizó su primera prueba nuclear), lanzándolas acaso desde su territorio al estadounidense. En el mundo de la Guerra Fría, de la confrontación entre las dos superpotencias —Estados Unidos y la Unión Soviética— que siguió al final de la Segunda Guerra Mundial (1945), aquello era peligroso, muy peligroso. Y por si fuera poco, el 12 de abril de 1961, un ruso, Yuri Gagarin (1934-1968) se convirtió en el primer humano en orbitar la Tierra (la altura máxima que alcanzó fue de 327 kilómetros), transportado por el vehículo espacial Vostok 1. El despegue del cohete se produjo a las 9:07 (hora de Moscú) y el aterrizaje a las 10:55 horas; duró, por tanto, 108 minutos, 89 de los cuales se emplearon en vuelo orbital. Estados Unidos había comenzado a planear esa misma senda poco después de la creación de la NASA: en efecto, en 1958 puso en marcha un proyecto espacial denominado Mercury (Mercurio, recordemos, era el dios romano de los mercaderes y de los viajeros). El primer vuelo tripulado del programa Mercury tuvo lugar, con el Mercury 3, el 5 de mayo de 1961, por consiguiente, menos de un mes después del realizado por Gagarin. El astronauta fue Alan Shepard, pero el suyo fue un vuelo suborbital, esto es, no llegó a rodear la Tierra: duró únicamente 15 minutos y, aunque exagerando, se podría decir que fue más parecido al lanzamiento con un cañón de una cápsula transportando a un hombre, que un vuelo como el de Gagarin. El primer astronauta norteamericano en rodear por completo la Tierra fue John Glenn, nueve meses después, con el Mercury 6, el 20 de febrero de 1962; el vuelo duró 4 horas y 55 minutos.

Pocos días después del vuelo de Shepard, el presidente John F. Kennedy (tomó posesión en enero de 1960) intensificó los esfuerzos espaciales norteamericanos anunciando, en un discurso que pronunció en el Congreso el 25 de mayo de 1961, que haría todo lo necesario para que fuese un estadounidense el primero en pisar la Luna: «Creo que esta nación», dijo entonces, «debería comprometerse a lograr el objetivo, antes de que acabe esta década, de llevar a un hombre a la Luna y traerlo de vuelta sano y salvo a la Tierra». Su programa se cumplió, aunque él no pudiese verlo: el 20 de julio de 1969, dentro de otro programa espacial, el programa Apollo, y en la misión número 11 de esta, el astronauta Neil Armstrong pisó la Luna (formaban parte de la misión otros dos astronautas:

Michael Collins, el piloto del módulo de mando, el Eagle, la nave nodriza de la que despegó el módulo que alunizaría con Amstrong y Edwin E. Aldrin, quien también tuvo el honor de pisar nuestro satélite; permanecieron en él 21 horas y 36 minutos; en conjunto el viaje de ida y vuelta a la Tierra duró algo más de ocho días, del 16 al 24 de julio de 1969).

La exploración espacial, y los poderosos cohetes que transportaban las cápsulas espaciales con astronautas eran importantes, prodigios de la tecnología, pero más importante aún era utilizar esos cohetes, u otros no tan gigantescos, para poner en órbita satélites de telecomunicaciones. Provistos de aparatos receptores adecuados, los satélites pueden servir como magníficas antenas entre dos puntos alejados entre sí; ahora bien, lo ideal es que un satélite de telecomunicaciones no cambie de posición con respecto a la superficie de la Tierra, ya que si se desplaza es necesario estar reorientando constantemente las antenas terrestres dirigidas a ese satélite. Para evitar semejante desplazamiento, el periodo de rotación orbital del satélite debe coincidir con el de la Tierra sobre su eje; esto es, que los satélites sean geoestacionarios, que parezca que están inmóviles en el cielo, algo que tiene lugar en una órbita a una distancia de la Tierra de unos 35.790 kilómetros. Es el denominado «Cinturón de Clarke», llamado así en honor al escritor de ciencia-ficción Arthur C. Clarke, que sugirió la idea en una «Carta del editor» que publicó en la revista Wireless World en una fecha tan temprana como febrero de 1945 (Clarke 1945). Sin embargo, parece que la idea de Clarke no atrajo atención hasta 1954: aquel año, John R. Pierce, que trabajaba en los Laboratorios Bell, asociados a la ATT, pronunció una conferencia (publicada el año siguiente) en la que señaló que los satélites de telecomunicaciones constituirían un magnífico negocio, incluso aunque no fuesen operativos las 24 horas del día (lo que ocurriría si se situaban en una órbita inferior a la del cinturón de Clarke); estimaba la capacidad de un satélite para transmitir llamadas telefónicas simultáneas en unas 1.000, frente a las 36 del primer cable telefónico transatlántico. Aun así hubo que esperar hasta 1962 para que los satélites se utilizasen para comunicaciones: el primero fue el Telstar 1, aún no geoestacionario (su órbita era baja), construido por ATT. Dos años después, ya orbitaban la Tierra dos satélites Telstar, dos Relay (fabricados por RCA, la Radio Corporation of America) y dos Symcom (Hughes Aircraft Company). Y en 1964, coincidiendo con los Juegos Olímpicos de Tokio, se produjo la primera retransmisión de televisión vía satélite de la historia.[103]

Resumiendo, cuando finalizaba la década de 1950 la ciencia e industria de las telecomunicaciones en Estados Unidos se encontraban en una situación boyante,

y aunque estimulado por motivos políticos, el mundo científico-tecnológico espacial —en parte (los satélites de comunicaciones) relacionado con el universo de las telecomunicaciones— pasaba a ocupar una posición central entre los intereses de las dos grandes potencias.

Y ahora ya sí, es el momento de volver a la cosmología.

LA CONSOLIDACIÓN DEL «BIG BANG»: EL FONDO DE RADIACIÓN DE MICROONDAS

El golpe de gracia para la cosmología del estado estacionario vino de un descubrimiento accidental: la observación de un «ruido» cósmico de fondo, interpretado inmediatamente como la huella fósil, ya muy debilitada, que había dejado la gran explosión primigenia, el Big Bang.

No hubiese sido extraño haber pensado que si la teoría del Big Bang era correcta debería existir una radiación de ese tipo, la idea no era tan difícil de imaginar, y debería haber precedido a la observación. Y de hecho así fue, aunque la idea nació en el contexto de los intentos por explicar la distribución de elementos químicos existente en el Universo. En 1942, un físico un tanto excéntrico, pero de indudable originalidad y rigor, nacido en Odesa (Ucrania) pero instalado en Estados Unidos desde 1933, George Gamow (1904-1968), dio una conferencia en la Academia de Ciencias de Washington D.C. en la que propuso que la abundancia de elementos encontrados podría explicarse como resultado de procesos desarrollados en una situación de no equilibrio, en la que un «objeto» superdenso compuesto de materia nuclear se fragmentase.[104] Obviamente, el modelo cosmológico de Lemaître era un buen candidato en este sentido, y también fue importante algo que Gamow ya había señalado en un artículo publicado en 1935 en una oscura revista, el Ohio Journal of Science (Gamow 1935), a saber, el interés que tenía el reciente descubrimiento (1932) del neutrón y los estudios de captura de neutrones en reacciones nucleares que estaba llevando a cabo entonces Enrico Fermi en Roma. En 1946, y habiendo tenido acceso a datos de captura de neutrones producidos durante el Proyecto Manhattan, Gamow (1946) publicó un trabajo ya más detallado, dedicado a la formación de núcleos atómicos diferentes mediante captura de neutrones. Obviamente, una de las cuestiones que debía tratar era la de los escenarios, indudablemente a temperaturas/energías extremadamente altas, en los que deberían tener lugar tales procesos nucleares. Ese año de 1946 fue también el año en que Ralph Alpher comenzó su tesis doctoral, con Gamow de director. El tema, la nucleosíntesis primordial. Alpher trabajaba entonces en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, que Gamow frecuentaba como asesor. Otro físico que también trabajaba en este laboratorio era Robert Herman. La vecindad entre Alpher y Herman dio paso a la colaboración, y en

1948 escribieron un artículo que contenía la predicción de una radiación cósmica de fondo residual, correspondiente a una radiación de un cuerpo negro a la temperatura de 5 grados kelvin (K) (Alpher y Herman 1948).[105]

La pregunta que ahora nos debemos hacer es si la predicción de Alpher y Herman recibió atención. La respuesta es que no. ¿Por qué? La razón, o al menos una parte de ella, reside en que, como vimos, un modelo de universo explosivo era poco atractivo por entonces. Recordemos que el año 1948 fue el de las publicaciones de Hoyle, Bondi y Gold presentando la cosmología del estado estacionario. En palabras de los propios Alpher y Herman (1990: 134-135):

¿Cuál era la visión dominante del Universo cuando comenzamos nuestro trabajo? La expansión del Universo era un fenómeno aceptado, pero muchos, incluyendo a Einstein, todavía se sentían más a gusto con la idea de un cosmos estático. En consecuencia, el medio intelectual era más fértil para la teoría del estado estacionario, que combinaba un cosmos en estado estacionario con una expansión mantenida por la creación de materia.

La escasa atención brindada al trabajo de Alpher y Herman fue tal que, cuando se descubrió aquella radiación residual, pocos se acordaron de que había sido predicha. Es más, el descubrimiento en cuestión se produjo no en un centro universitario, sino en uno industrial: en los Laboratorios Bell de New Jersey. Pero para entender bien cómo se llegó a ese descubrimiento es necesario explicar antes otros puntos.

En la década de 1940, el principal negocio de ATT, de quien dependían los Laboratorios Bell, era, como su nombre indica, el de las comunicaciones telegráficas y telefónicas, al que pronto se añadirían las transmisiones de televisión. Por ello, tenía que crear y mantener una extensa red de cables: fabricarlos y enterrarlos (las transmisiones de televisión de la costa este a la oeste utilizaban cables coaxiales). Era inevitable que surgiera la idea de sustituir los cables por antenas; para probar la idea, a finales de la década de 1940, los Laboratorios Bell construyeron —bajo la dirección de Harald Friis, jefe del departamento de investigación del laboratorio ubicado en Holmdel— siete antenas para unir Nueva York con Boston a través de torres con emisores y

receptores en el rango de las microondas (longitudes de onda entre 1 metro y 1 milímetro). Las antenas que culminaban las torres eran del tipo bocina, parecidas vagamente a los megáfonos. Una década más tarde, el 6 de enero de 1959, con los Sputnik ya orbitando, dos miembros de los laboratorios, John Pierce y Rudi Kompfner, presentaban una propuesta en la que señalaban la posibilidad de que «los satélites proporcionasen canales transoceánicos de banda ancha más baratos que el cable u otros mecanismos».[106] «Es importante», añadían, «que los Laboratorios Bell asuman un papel de liderazgo en la investigación de comunicaciones vía satélite». La propuesta fue autorizada por ATT, bajo el nombre de «Proyecto Echo».

Uno de los elementos del proyecto era un globo de fibra de aluminio, de 30 metros de diámetro, situado a entre 1.300 y 1.600 kilómetros de altura, que lanzó la NASA en el otoño de 1960, con el propósito de dirigir a este las señales electromagnéticas, que reflejaría de vuelta, para ser recogidas por una antena. En el contexto de este proyecto, en 1961, E. A. Ohm, un físico que trabajaba en otra de las instalaciones de los Laboratorios Bell, esta situada en Crawford Hill, New Jersey, construyó una antena de 6 metros, de nuevo del tipo bocina, para recibir señales de microondas procedentes del globo Echo. En las observaciones realizadas en la longitud de onda de 11 cm., Ohm (1961: 1079-1080) encontró un exceso de temperatura de 3,3 K en la antena, pero este resultado apenas atrajo atención alguna. Publicó sus resultados en una revista de los Laboratorios: The Bell System Technical Journal.[107]

La geometría tipo bocina de la antena que utilizó Ohm tenía la ventaja de reducir mucho las interferencias: se había diseñado para comunicarse, vía el globo Echo, con el satélite Telstar que, como vimos anteriormente, la compañía estaba a punto de poner en órbita, lo que sucedió en 1962 (la antena debía ser muy precisa, ya que debido a la forma del globo, las señales que incidiesen en él tendrían una amplia dispersión). En 1963, conocedor de la existencia de esta antena, Robert Wilson (n. 1936) dejó su puesto posdoctoral en Caltech para aceptar un trabajo en los Laboratorios Bell. Arno Penzias (n. 1933), un graduado de la Universidad de Columbia (Nueva York) tres años mayor que Wilson, ya llevaba por entonces dos años en los laboratorios. Afortunadamente, aquel mismo año, la antena, pequeña pero de gran sensibilidad, pudo ser utilizada para estudios de radioastronomía, ya que la compañía decidió abandonar el negocio de comunicaciones vía satélite. Realizando medidas para una longitud de onda de 7,4 centímetros, Penzias y Wilson encontraron una temperatura de 7,5 K, cuando debía haber sido únicamente de 3,3 K. Además, esta radiación (o

temperatura) suplementaria, que se creía efecto de algún ruido de fondo, resultó ser independiente de la dirección en la que se dirigiese la antena.[108] Los datos obtenidos indicaban que lo que estaban midiendo no tenía origen ni atmosférico, ni solar, ni galáctico. Era un misterio.

La solución a este misterio llegó dos años más tarde, del grupo encabezado por Robert Dicke en la cercana Universidad de Princeton. Veinte años antes, en el Massachusetts Institute of Technology, Dicke había medido, junto a otros colegas, la absorción de radiación de microondas por la atmósfera terrestre, utilizando para ello un radiómetro muy sensible. Encontró que existía un límite superior de 20 K para la «radiación de materia cósmica» en el rango de las microondas (Dicke, Beringer, Kyhl y Vane 1946). El que se refirieran a la radiación de una «materia cósmica», indica que no estaban pensando en términos cosmológicos. Pero, en 1964, instalado en Princeton, Dicke consideró la posibilidad de que el Universo fuese oscilatorio, lo que significaba que durante las épocas de compresión se produjese radiación que dejase huellas residuales medibles. Pidió, en consecuencia, a un colega de Princeton, James Peebles, que calculase las características observables de semejante radiación, mientras que él, junto a Roll y Wilkinson, se dedicó a construir un radiómetro de microondas que él mismo diseñó. En 1965, Peebles dio un seminario en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins (el mismo al que habían pertenecido Alpher y Herman), durante el cual mencionó que, según sus cálculos, debería existir una radiación de fondo correspondiente a la temperatura de 10 kelvin. Uno de los asistentes a aquel seminario, Bernard Burke, un radioastrónomo del MIT, informó a Penzias y Wilson, y estos contactaron con el grupo de Princeton. De esta forma, finalmente comprendieron el significado de sus observaciones. Penzias y Wilson (1965) publicaron sus resultados, sin hacer ninguna mención a sus posibles implicaciones cosmológicas, y Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson (1965) la interpretación. En su artículo, Penzias y Wilson daban un valor de 3,5 kelvin; según las estimaciones actuales, unos 2,7 K.

Como vemos, y al igual que la aparición de los radiotelescopios, Penzias y Wilson pudieron detectar el fondo de radiación de microondas gracias a la disponibilidad de nuevas tecnologías. Gracias a tales recursos tecnológicos —y también, por supuesto, a la dinámica interna de la investigación científica— fue ampliándose la imagen del cosmos, poblándose de nuevos «habitantes». Y así llegaron otros descubrimientos, de los que a continuación destacaré dos: púlsares y cuásares.

CUÁSARES

A finales de la década de 1950, el descubrimiento de radiofuentes estimuló la inversión en la construcción de nuevos radiotelescopios con la intención de establecer programas de investigación destinados a explorar de manera sistemática el Universo, no solo para detectar más radiofuentes sino también, y acaso sobre todo, para lograr comprender su naturaleza, además de para emplearlas (como estaba haciendo Ryle en Cambridge, con relación a la cosmología del estado estacionario) como prueba de validez de los modelos cosmológicos. Muchas de las radiofuentes detectadas no se podían asociar a objetos visibles: el Tercer Catálogo de Cambridge («3C»), incluía cientos de radiofuentes carentes de contrapartidas ópticas. Entre las radiofuentes extragalácticas que pudieron ser localizadas con seguridad, la mayoría resultaba proceder de algunas de las galaxias más masivas conocidas, que son muy luminosas y cuyo desplazamiento hacia el rojo, z, era muy elevado.[109] En 1960, el desplazamiento hacia el rojo más grande encontrado era de z = 0,46 y correspondía a una radiogalaxia observada por Rudolph Minkowski (1960) utilizando el telescopio óptico de Monte Wilson.

La mención de Rudolph Minkowski (1895-1976) invita a una pequeña digresión, no del todo irrelevante si se tiene en cuenta el distinguido papel que desempeñó en la astrofísica estadounidense. Minkowski llegó a Estados Unidos, al Observatorio de Monte Wilson, en mitad de su carrera académica, en 1935. Si abandonó su Alemania natal, siendo catedrático en el Physikalisches Staatsinstitut de Hamburgo, fue debido a la «Ley para la protección de la sangre y el honor germano» que Adolf Hitler proclamó en 1935; tanto él como su esposa procedían de distinguidas familias de origen judío. La carrera de Minkowski en Alemania había estado centrada en la física atómica, pero en Hamburgo conoció a Wolfgang Pauli y a los astrofísicos Albrecht Unsöld y Walter Baade. Como ya vimos, en 1931 Baade emigró a Estados Unidos, instalándose en el Observatorio de Monte Wilson: fue gracias a Baade, que convenció a Walter Adams para que contratase a Minkowski, argumentando que sería muy útil por sus conocimientos de física teórica y, en especial, de óptica aplicada y espectroscopía teórica, cómo Minkowsi recaló allí. La lección histórica a extraer es clara: como en otros campos de la ciencia, la política racista de Hitler ayudó a la astrofísica estadounidense en una época en la que, además,

el centro astrofísico había dejado ya la vieja Europa instalándose, con telescopios más potentes y cielos más claros, en Norteamérica y Australia.

Establecido esto, retomaré la explicación del camino que condujo al descubrimiento de los cuásares.

Entre los que se esforzaban por determinar mediante telescopios ópticos las posiciones de radiofuentes, se encontraban Alan Sandage y Thomas Matthews. El primero formaba parte, como ya vimos, del Observatorio de Monte Palomar, mientras que el segundo trabajaba en otra instalación de Caltech, el Observatorio de Owens Valley. Utilizando primero, como interferómetro, dos antenas de 27,5 metros de este último centro, pudieron determinar con bastante precisión la posición de las radiofuentes, y luego, recurriendo al telescopio de 5 metros de Monte Palomar, trataban de observar ópticamente el cuerpo celeste productor de la radioemisión. Así, en 1960 lograron asociar la radiofuente 3C 48 con lo que parecía una estrella azul de poca luminosidad; en 1962 ya habían identificado con estrellas (de un extraño tipo por lo que a su espectro óptico se refiere) tres de las radiofuentes más activas, la citada 3C 48, más 3C 196 y 3C 286 (Matthews y Sandage 1963). Pero el gran avance ocurrió cuando, también en 1962, y beneficiándose de la predicción de que una radiofuente conocida, 3C 273, iba a ocultarse cinco veces detrás de la Luna, un radioastrónomo inglés, Cyril Hazard, que trabajaba desde finales de 1960 en el Observatorio Parkes de Australia, justo cuando se iba a poner en funcionamiento un radiotelescopio con un disco de 64 metros (comenzó a ser operativo en 1961), estableció con gran precisión la posición de esa radiofuente, que en principio se consideró una estrella de magnitud 13, esto es, muy brillante (Hazard, Mackey y Shimmins 1963). Y en este punto entra en escena un astrónomo holandés, Maarten Schmidt, que había estudiado con Oort y obtenido su doctorado en el Observatorio de Leiden en 1956. Tres años después, Schmidt obtuvo un puesto en el California Institute of Technology donde utilizó el telescopio Hale de Monte Palomar. Con él, pudo localizar ópticamente la posición de 3C 273, encontrando (Schmidt 1963) que las líneas de su espectro estaban desplazadas hacia el extremo del rojo en una magnitud, z=0,158, que revelaba que se alejaba de la Tierra a una velocidad enorme: al 16 por ciento de la velocidad de la luz. Utilizando la ley de Hubble, que afirma que las galaxias se alejan entre sí a una velocidad proporcional a su distancia, se deducía que 3C 273 estaba muy alejada, lo que a su vez implicaba que se trataba de un objeto extremadamente luminoso, más de 100 veces superior al de una galaxia típica. Para Schmidt, solo existían dos posibilidades: una, que fuese una estrella con un gran desplazamiento gravitacional hacia el

rojo; «su radio», especificaba, «tendría entonces que ser del orden de 10 km.», pero basándose en consideraciones extraídas del espectro observado concluía que «sería extremadamente difícil, si no imposible» que se tratase de una estrella. Más factible era la segunda posibilidad: «que el objeto estelar sea la región nuclear de una galaxia», esto es, un núcleo hiperactivo de galaxia (su luminosidad óptica era alrededor de 1.000 veces superior a la luminosidad de una galaxia como la Vía Láctea), y que estuviese situada a una distancia de 500 megaparsecs.[110] Los entes cósmicos al que pertenecía 3C 273 fueron bautizados como «quasi-stellar sources» (fuentes cuasi-estelares), esto es, quasars (cuásares).[111] Poco después, Greenstein y Matthews (1963) anunciaban que 3C 48 tenía un z de 0,3675, y Schmidt y Matthews (1964) que otras radiofuentes de tipo cuásar, 3C 47 y 3C 147, tenían un valor de z de 0,425 y 0,545, respectivamente, resultados que reforzaban la singularidad de los cuásares.

El descubrimiento de los cuásares tuvo una afortunada consecuencia que se manifestó con claridad en un congreso que se celebró en Dallas, del 16 al 18 de diciembre de 1963, que terminó siendo denominado «Primer Simposio Texas sobre Astrofísica Relativista». Fue allí, y entonces, cuando astrónomos ópticos y radioastrónomos se reunieron por primera vez con astrofísicos teóricos y, en particular, expertos en relatividad general. En el «Prefacio» que abre el libro en el que se recogieron las intervenciones del simposio, se explicaba el origen de la reunión; es interesante citar parte de lo que se decía allí (Robinson, Schild y Schucking, eds. 1965: v):

En junio de 1963, Peter Bergmann y los editores de este volumen enviaron invitaciones para el simposio, que comenzaba como sigue:

«Durante más de diez años, la naturaleza de las intensas radiofuentes extragalácticas ha sido uno de los problemas más fascinantes de la astronomía moderna. Durante un tiempo se creyó que tales radiofuentes se debían a la colisión de galaxias. Pero en el curso de los últimos años se ha hecho patente que, en la mayoría de los casos, esta explicación no se puede sostener. La naturaleza espectacular de las intensas radiofuentes queda aclarada si se considera la enorme cantidad de energía implicada. Las estimaciones indican que en tales procesos se consumen más de 10^{60} ergios, un peso de más de quinientos mil soles. Hasta ahora, este requisito energético se había descartado en casi todas

las explicaciones y teorías propuestas para explicar semejantes sucesos extraordinarios.

En febrero, Fred Hoyle y William Fowler sugirieron que energías que condujesen a la formación de radiofuentes podían ser suministradas por el colapso gravitacional de una superestrella. Tal objeto, con una masa de entre cien mil y cien millones de masas solares, podría estar situado en el centro de la galaxia. El colapso gravitacional de este supersol, podría suministrar la energía necesaria si se contrajese a un tamaño cercano al radio de Schwarzschild.[112]

El pasado marzo, astrónomos y radioastrónomos de Australia y California identificaron dos radiofuentes con galaxias de un tipo nunca visto antes. La fuente 3C273B parece ser una superestrella, y según Harlan Smith tiene un tamaño de alrededor de una semana-luz. Es el objeto más luminoso conocido en el Universo, aproximadamente mil millones de veces más luminoso que el Sol. Según Sandage y Smith, su luminosidad varía el 50 por ciento.

Los intrigantes nuevos descubrimientos y la teoría propuesta por Hoyle y Fowler abren la discusión a un gran número de cuestiones excitantes. Entre los problemas que se suscitan se encuentran los siguientes:

a) Los astrónomos han observado algunos objetos inusuales relacionados con radiofuentes. ¿Son estos el residuo de una implosión gravitacional?

b) ¿Mediante qué mecanismo se convierte la energía gravitacional en radioondas?

c) Bajo nuestras actuales suposiciones, ¿conduce el colapso gravitacional a una contracción indefinida y a una singularidad en el espacio-tiempo?

d) Si es así, ¿en qué forma debemos modificar nuestras suposiciones teóricas para evitar esta catástrofe?

Estas son solo algunas de las cuestiones planteadas por este interesante nuevo desarrollo en astronomía y relatividad general.

Se deduce de todo lo anterior que los básicos y muy variados aspectos de la cuestión del colapso gravitacional hacen imperativo reunir expertos de muchos campos para una profunda discusión. Después de comentarlo con algunos de los protagonistas, hemos llegado a la conclusión de que una conferencia a finales de

este año en el Southwest Center for Advanced Studies en Dallas, Texas, podía ser un buen momento.

La asistencia a este simposio fue extraordinaria: cerca de 300 científicos de diversos países. Evidentemente, la comunidad de astrónomos y relativistas se daba cuenta de que se estaba en los albores de una nueva época. Hasta entonces, como veremos más adelante en este mismo capítulo, el campo de la teoría de la relatividad general estaba dominado más por matemáticos que por físicos que se preocupasen por las consecuencias observacionales de la teoría gravitacional de Einstein. Para aspirar a entender qué eran realmente los cuásares, objetos en los que obviamente el campo gravitacional debía de ser muy intenso, era preciso recurrir a la relatividad general. En el discurso de la cena de despedida del simposio, Thomas Gold señaló (Robinson, Schild y Schucking eds. 1965; citado en Longair 1995: 1776): «Todo el mundo está contento: los relativistas, porque sienten que son apreciados, de repente se han convertido en expertos en un campo en el que prácticamente nada nuevo existía; los astrofísicos porque han ampliado su dominio, su imperio, al añadir un tema nuevo: la relatividad general».

Desde su descubrimiento, se han observado varios millones de cuásares, aproximadamente el diez por ciento del total de galaxias brillantes (muchos astrofísicos piensan que una buena parte de las galaxias más brillantes pasan durante un breve periodo por una fase en la que son cuásares). La mayoría están muy alejados de nuestra galaxia, lo que significa que la luz que se observa ha sido emitida cuando el Universo era mucho más joven. Constituyen, por consiguiente, magníficos instrumentos para el estudio de la historia del Universo.

PÚLSARES Y ESTRELLAS DE NEUTRONES

En 1967, un nuevo radiotelescopio, que operaba a la frecuencia de 81,5 megahercios, comenzó a funcionar en el Observatorio Mullard de Radioastronomía, dependiente del Laboratorio Cavendish de Cambridge.[113] El radiotelescopio en cuestión, diseñado por Anthony Hewish (n. 1924), consistía en una serie de cables suspendidos de postes dispuestos con geometría rectangular en dieciséis filas de 128 elementos, ocupando un terreno equivalente a 57 pistas de tenis: los receptores empleados se combinaban formando un interferómetro. Estaba diseñado para estudiar la estructura angular de los cuásares observando el centelleo producido por la estructura irregular del medio interplanetario. Las observaciones sistemáticas se iniciaron en noviembre de aquel mismo año y pronto se detectaron señales consistentes en pulsos de 0,3 segundos de duración, con un periodo de repetición de unos 1,337 segundos, que se mantenía con extrema precisión. Responsable de aquellas observaciones era una mujer, Jocelyn S. Bell (n. 1943), una estudiante de doctorado norirlandesa de Hewish, el director del proyecto. La regularidad de las señales era tal que en el artículo en el que el grupo anunció el descubrimiento, escribían (Hewish, Bell, Pilkington, Scott y Collins 1968: 709): «La sorprendente naturaleza de estas señales sugirió inicialmente un origen en términos de transmisión debidas a humanos, que podían proceder de sondas del espacio profundo, radares planetarios o de la reflexión de señales terrestres procedentes de la Luna». «Sin embargo», añadían, «no puede aceptarse ninguna de estas interpretaciones debido a que la ausencia de paralaje demuestra que la fuente se halla muy lejos del Sistema Solar.» Hewish y sus colaboradores estimaban (basándose en la ausencia de un paralaje mayor de unos 2 segundos) que la fuente observada se encontraba a una distancia superior a 10^3 U.A. (unidades astronómicas; 1 U.A.= la distancia media entre el Sol y la Tierra), y que, si la emisión era isótropa, la energía emitida durante un solo pulso superaba los 10^{17} ergios; en cuanto a su tamaño, sus cálculos indicaban que no podía ser mayor que $4{,}8 \cdot 10^3$ km. Con respecto a la naturaleza de la radiofuente, la regularidad de los pulsos les sugería que podía ser una estrella, «en lugar de una perturbación de alguna atmósfera estelar». Y en este punto añadían: «Con respecto a esto, es interesante advertir que se ha sugerido que las pulsaciones radiales de estrellas de neutrones pueden desempeñar un papel importante en la historia de supernovas y en restos de supernovas». En otras palabras: la radiación podría estar vinculada a estrellas de

neutrones, o también, señalaban, a enanas blancas.[114]

A pesar del papel que desempeñó Jocelyn Bell en el descubrimiento de los púlsares, cuando la Academia Sueca decidió, en 1974, otorgar el Premio Nobel de Física a ese hallazgo, el galardonado fue Hewish, «por su decisivo papel en el descubrimiento de los púlsares», compartiendo el premio con Martin Ryle, «por sus investigaciones pioneras en radioastronomía». Aquella fue una decisión cuanto menos cuestionable. Uno de los pocos científicos que manifestaron su disconformidad ante el olvido de Jocelyn Bell fue Fred Hoyle. Veamos lo que escribió en su autobiografía (Hoyle 1994: 245):

Una semana antes de que el descubrimiento de los púlsares fuese anunciado en Nature por un amplio «grupo», un miembro del Laboratorio Cavendish apareció en mi despacho con la información de que algo de gran importancia iba a anunciarse en el próximo seminario del Laboratorio, pero que, al haber jurado mantener el secreto, no podía decirme de qué se trataba. El seminario fue el miércoles anterior a la habitual publicación de los viernes de Nature [apareció el 28 de febrero de 1968]. No hubo nada en la presentación que me indicase que una estudiante graduada, Jocelyn Bell (como era conocida entonces) había sido la descubridora, ni se produjo tal atribución en la forma en que el descubrimiento de los púlsares se presentó después al mundo. Varios años después, me tocó a mí explicar, en términos algo bruscos, qué es lo que había sucedido realmente. Pero entonces, con el mundo pesando sobre su cabeza, la verdad no fue bienvenida en los círculos respetables. La atribución falsa había sido aceptada. Fue la corrección de la falsa atribución lo que no se aceptó.[115]

De hecho, la opinión de Hoyle terminó haciéndose pública. Esto ocurrió después de que Hewish recibiese el Premio Nobel. Al final de una conferencia que pronunció en la Universidad McGill de Montreal en 1975, Hoyle tuvo que responder a algunos periodistas. Tras preguntarle sobre las propiedades de los púlsares, inesperadamente uno de los periodistas le preguntó si el último Premio Nobel de Física no debería haber incluido también a Jocelyn Bell. «Sí, Jocelyn Bell fue quien los descubrió, no Hewish.» Y añadió: «Cuando la doctora Bell confirmó sus hallazgos iniciales, sus directores lo mantuvieron en secreto durante meses». Sus declaraciones pronto hallaron eco en periódicos de todo el

mundo, en Inglaterra en The Times y Daily Mail. Hewish reaccionó con furia: «Lo que ha dicho Hoyle es falso, absolutamente falso». Mientras que Bell manifestó: «Fue el profesor Hewish quien realizó el trabajo preparatorio; yo fui la persona que analizó los datos».[116]

Y a todo esto, ¿qué pensaba Jocelyn Bell? La respuesta la encontramos en una charla «después de la cena» que pronunció durante el Octavo Simposio Texas sobre Astrofísica Relativista, celebrado en Boston del 13 al 17 de diciembre de 1976 (Bell Burnell 1977):[117]

Se ha sugerido que yo debería haber tenido una parte de Premio Nobel recibido por Tony Hewish por el descubrimiento de los púlsares. Hay varios comentarios que me gustaría hacer sobre esto. Primero, las disputas de apropiación entre supervisores y estudiantes son siempre difíciles, probablemente imposibles de resolver. Segundo, es solo el supervisor quien tiene la responsabilidad final del éxito o fracaso del proyecto. Todos hemos oído de casos en los que el supervisor culpa a su estudiante por un fracaso, pero sabemos que, en gran medida, la culpa es del supervisor. Tercero, creo que desmerecería a los Premios Nobel si se concedieran a estudiantes de investigación, excepto en casos muy excepcionales, y yo no creo ser uno de ellos.

En su charla, Bell Burnell también señaló, en una clara alusión a Hoyle, que «los comentarios de que mantuvimos en secreto demasiado tiempo el descubrimiento están fuera de lugar». Ahora bien, dicho esto, si se lee el texto completo de su intervención en el Texas Simposium, aunque queda claro que la iniciativa en el programa de investigación y en las técnicas astronómicas empleadas fue de Hewish, y que Bell únicamente estaba encargada de operar el radiotelescopio y analizar los datos, no es menos evidente que fue ella quien se dio cuenta de lo que significaban las señales que se recibían, unas señales que no eran fáciles de detectar, existiendo la posibilidad de que Hewish no hubiese sido capaz de identificarlas. Y poco más se puede decir, salvo que si Jocelyn Bell no pensaba, en el fondo de su corazón, lo que defendió en la reunión de Boston, fue tan prudente como elegante. Siempre nos quedará la duda.[118] En cualquier caso, e independientemente de dónde reside la verdad y, también, de que hay que situar este suceso en el contexto del enfrentamiento que, relacionado con la teoría del

estado estacionario, Hoyle mantuvo con los astrónomos de Cambridge, con Ryle en particular, lo que me interesa sobre todo de este triste episodio es mostrar a través de él algo que no es infrecuente en la ciencia: los debates, las agrias polémicas por la prioridad de un descubrimiento, una «tradición» en la que destaca el enfrentamiento que se produjo entre Newton y Leibniz por la invención del cálculo infinitesimal.

La posibilidad de que existieran estrellas de neutrones —especie de núcleos gigantes formados únicamente por neutrones y unidos por la fuerza de la gravedad—, había sido propuesta, por primera vez, en 1934 (esto es, solo dos años después de que Chadwick descubriese el neutrón) por el físico y astrofísico suizo afincado en California (Caltech) Fritz Zwicky (1898-1974) junto con Walter Baade. El contexto del trabajo de estos dos científicos (Baade y Zwicky 1934 a) fue el de las estrellas que, de repente, en ocasiones, aparecen en el cielo siendo posible observarlas directamente desde la Tierra durante algún tiempo, estrellas novas como la que habían observado, cerca del cénit en Casiopea, a partir de finales de 1572, el danés Tycho Brahe y Jerónimo Muñoz, un catedrático de Hebreo y Matemáticas de la Universidad de Valencia, y luego de Astrología en Salamanca.[119] Con su enciclopédico conocimiento astronómico, Baade sabía que además de las novas ordinarias (common novae) a veces aparecían otras de mucha mayor intensidad, para las que acuñaron el término supernova, término que aparecía encabezando el artículo que publicaron. En esta publicación no aparece interpretación alguna sobre lo que podían ser las supernovas, pero sí en un artículo que seguía inmediatamente a ese: «Rayos cósmicos procedentes de supernovas», en el que se lee (Baade y Zwicky 1934 b: 263): «Con toda reserva adelantamos la idea de que una supernova representa la transición de una estrella ordinaria a una estrella de neutrones, formada principalmente por neutrones. Tal estrella puede tener un radio muy pequeño y una densidad extremadamente elevada. Como los neutrones se pueden agrupar de manera mucho más compacta que los núcleos ordinarios y los electrones, la energía del «agrupamiento gravitacional» en una estrella de neutrones fría puede llegar a ser muy grande y, bajo ciertas circunstancias, puede superar, con mucho, las proporciones del agrupamiento nuclear ordinario. Por consiguiente, una estrella de neutrones representa la configuración de materia más estable. Las consecuencias de esta hipótesis se desarrollarán en otro lugar, donde también se mencionarán algunas observaciones que tienden a apoyar la idea de cuerpos estelares constituidos principalmente de neutrones».

Naturalmente, si no hubiera sido porque poco antes James Chadwick, en 1932,

había descubierto el neutrón, no habría sido posible imaginar que existieran «estrellas de neutrones», un término que también se introdujo, por primera vez, en este artículo de Baade y Zwicky (parece que fue este y no Baade el principal responsable de la idea de estrellas de neutrones).

La idea de estrellas de radios muy pequeños revivió trabajos previos que el físico indio Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) había realizado en Inglaterra. El problema que abordó Chandrasekhar pertenecía al dominio del equilibrio de las estrellas, de la interacción entre la fuerza de contracción de la gravedad y la presión, en el sentido opuesto, de la radiación que emiten las estrellas, un problema que, por entonces, ya poseía una larga tradición. El primer nombre que hay que mencionar en esa tradición es el de Arthur Eddington y el libro que publicó en 1926: The Internal Constitution of the Stars, del que Subrahmanyan Chandrasekhar (1988: vii) escribió, en un prólogo a una nueva edición: «Cuando se publicó The Internal Constitution of the Stars de Eddington, fue inmediatamente considerada como una de las grandes obras de arte de la literatura astronómica. Fue uno de los libros que más influyó en el desarrollo de la astronomía durante las dos décadas que siguieron a su publicación». En aquel texto, Eddington mostró que para entender la estructura de las estrellas, incluyendo el tipo a que pertenecen (la masa que tienen y la luminosidad que emiten) y cómo evolucionarán, es imprescindible ocuparse de la presión de la radiación. Veamos cómo explicaba de qué fenómeno se trata en otro de sus libros, Stars and Atoms (Eddington 1927; 1928: 46-49):

Ahora ya podemos hacernos una imagen de cómo es el interior de una estrella. Es un tumulto de átomos, electrones y ondas etéreas. Los átomos, completamente ionizados, se mueven con una velocidad de unos 150 kilómetros por segundo, habiéndose separado de ellos su cortejo normal de electrones durante las apreturas. Los electrones libres se mueven con una velocidad 100 veces mayor, buscando nuevos lugares de reposo [...] Y ¿cuál es el resultado de ese alboroto? Muy pequeño. Los átomos y los electrones tienen siempre tanta prisa que no se establecen en ninguna parte. No hacen más que cambiar de lugar. Las ondas etéreas constituyen la única capa de población que tiene algo de permanencia. Aunque aparentemente marchan en todas las direcciones, sin distinción, en conjunto realizan un avance lento hacia el exterior. Este no existe para los átomos y electrones; la gravitación se lo impide. Pero las ondas etéreas, encerradas en el interior, fluyen lentamente hacia el exterior [...]. La onda etérea

va y viene de un átomo a otro, ora es absorbida, ora lanzada en una nueva dirección, perdiendo su identidad [...]. Pero lo que deseamos determinar particularmente es el flujo. Para ello, hemos de estudiar con cuidado lo que sucede en esa multitud agitada [...] La tarea del matemático consiste en calcular —con la ayuda de las leyes y teorías deducidas del estudio de este mismo proceso en el laboratorio— los dos factores, el factor que tiende a producir el flujo y el que tiende a evitarlo; y como consecuencia encontrará el flujo resultante. Este flujo, así calculado, deberá, sin duda, estar de acuerdo con las medidas astronómicas de la energía calorífica y luminosa emitida por la estrella. Y así llegamos finalmente a una comprobación experimental de las teorías.

En la cita anterior, vemos que Eddington incorporaba ya los avances que se estaban realizando en la física atómica. Fue, en este sentido, uno de los grandes pioneros en una línea de investigación que se impondría con rapidez en la astrofísica. Otro ejemplo de lo mucho que la física atómica podía ofrecer al estudio del cosmos tuvo a Eddington como uno de sus primeros protagonistas, ya que enseguida este se dio cuenta de la inmensa importancia del descubrimiento que llevó a cabo en 1920, en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, Francis Aston. Utilizando el espectrógrafo de masas que él mismo había desarrollado, Aston pudo medir con exactitud la masa de una serie de átomos. En el artículo que publicó escribía (Aston 1920: 625): «En el caso del helio, del oxígeno normal y de todos los demás elementos [la suma de la masa de sus núcleos] no será exactamente la suma de las masas de sus constituyentes sino probablemente menor». Se encontró, efectivamente, que la masa de un núcleo de helio era en torno a un 0,8 por ciento menor que la masa de sus constituyentes. Eddington razonó que la diferencia se había convertido en energía, como enseñaba la ya entonces conocida ley de Einstein, $E=mc^2$, y que esa energía podía explicar por qué las estrellas «ardían» durante tanto tiempo. En otras palabras, Eddington reconoció dos rasgos fundamentales —todavía hoy se consideran así— para poder comprender la constitución interna de las estrellas: que la presión de la radiación debe desempeñar un papel importante en mantener el equilibrio de las estrellas de masa cada vez mayor, y que la «quema» de hidrógeno para formar helio era la fuente más probable de energía estelar.

No mucho después, Ralph Fowler (1926), colega de Eddington en Cambridge (y yerno de Rutherford), recurrió a la nueva mecánica cuántica para argumentar que la solución a la propuesta de Eddington por la que una estrella, como la

compañera de Sirio, debía tener un área y un radio muy pequeños —lo que implicaba una densidad increíblemente elevada— se encontraba considerando que el material de las enanas blancas era un gas de electrones degenerado, es decir, que obedecía a la estadística de Fermi-Dirac.

No obstante, el tratamiento teórico de Fowler no era relativista; esto es, no utilizaba la teoría de la relatividad especial. Y en este punto entra en escena Chandrasekhar, que se dio cuenta de esa limitación y produjo una serie de artículos (Chandrasekhar 1931 a, b, 1932 a, b) en los que asumiendo que los electrones se movían a velocidades muy próximas a la de la luz, estableció una relación entre la presión y la densidad de un gas de electrones relativistas degenerados. Este nuevo tratamiento conducía a la existencia de un límite para la masa de una enana blanca y también concluía que, a partir de una cierta masa (ahora conocida como «límite de Chandrasekhar») la contracción gravitacional no podría detenerse formándose una enana blanca. Semejante conclusión no agradó nada a Eddington, como quedó de manifiesto en la reunión de la Royal Astronomical Society que tuvo lugar el 11 de enero de 1935. Aquel día, en una de las comunicaciones de la sesión, el joven Chandra presentó sus aportaciones. Eddington, el gran, admirado y respetado Eddington, estaba en la audiencia; era, de hecho, otro de los que debían intervenir ese día. Y lo hizo después de escuchar al joven astrofísico indio (Eddington 1935):[120]

Utilizando la fórmula relativista que ha sido aceptada durante los últimos cinco años, Chandrasekhar demuestra que una estrella de masa mayor que un cierto límite M continúa siendo un gas perfecto y nunca se puede enfriar. La estrella tiene que seguir radiando y radiando, y contrayéndose y contrayéndose hasta que, supongo, alcanza un radio de unos pocos kilómetros, cuando la gravedad es lo suficientemente fuerte como para detener la radiación y la estrella puede por fin reposar en paz.

El Dr. Chandrasekhar había obtenido este resultado antes, pero lo ha pulido en su último artículo; y cuando lo discutí con él llegué a la conclusión de que esto era casi una reductio ad absurdum de la fórmula relativista de degeneración. Diversos accidentes pueden intervenir para salvar a la estrella, pero yo quiero más protección que esa. ¡Creo que debería existir una ley de la naturaleza que impida a una estrella comportarse de semejante absurda manera!

«Es evidente», escribió muchos años después Chandrasekhar (1983: 52), «que Eddington comprendió perfectamente, ya en 1935, que dada la existencia de un límite superior a la masa de configuraciones degeneradas, uno debe contemplar la posibilidad de un colapso gravitacional que conduzca a lo que ahora llamamos agujeros negros. Pero no estaba dispuesto a aceptar una conclusión a la que él mismo tan proféticamente llegó; y se convenció a sí mismo que "debería existir una ley de la naturaleza que impida a una estrella comportarse de esta absurda manera"».[121]

El siguiente paso en esta compleja y, para algunos, pasional historia tuvo como protagonistas a un puñado de físicos, de los que destacan Lev Davidovich Landau (1908-1968), George Gamow y Robert Oppenheimer. Landau, cuyo nombre apareció brevemente en el capítulo primero a propósito de un artículo que firmó junto a Rudolf Peierls sobre la medida del campo electromagnético en la física cuántica, fue un físico extraordinario, que dejó su huella en diversos campos de la física teórica, incluyendo un famoso curso de física en diez volúmenes, escrito en colaboración con otro distinguido físico ruso, Evgeny M. Lifshitz. En 1962, Landau recibió el Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre la teoría de la superfluidez, que explicaba las propiedades del helio II líquido a temperaturas inferiores a 2,17 K. Hijo de un ingeniero de origen judío, perteneció a la auténtica primera generación soviética de científicos, aquellos educados inmediatamente después de la Revolución.[122] Se licenció y doctoró, con Vladimir Fock, en la universidad de la entonces llamada Leningrado, iniciando a continuación, becado por el gobierno soviético, un periodo de 18 meses (entre 1929 y 1930) de estudios en centros de física de Suiza, Alemania, Dinamarca, Inglaterra, Bélgica y Holanda. Fue precisamente en uno de los centros por los que pasó, el Instituto de Zúrich dirigido por Wolfgang Pauli, donde, en febrero de 1931, Landau completó un breve artículo «Sobre la teoría de las estrellas» que, por razones desconocidas, envió a publicar un año después al Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion, la primera revista de física que se publicó en la Unión Soviética en la que los artículos aparecían en inglés (Landau 1932).[123] Aunque no se refería en él a las estrellas de neutrones (el neutrón se descubrió, no lo olvidemos, en 1932), este trabajo contenía resultados que se pudieron leer más tarde bajo la luz de «estrellas de neutrones». En particular demostró que una estrella formada por un gas de Fermi (un sistema formado por fermiones que no interaccionan entre sí)) y que superase 1,5 veces la masa del Sol no podrá evitar «colapsar a un punto».[124] Seis años después, apareció otro

artículo de Landau, este en una revista mucho más conocida, la inglesa Nature. «Es bien sabido», se lee en él (Landau 1938: 333), «que la materia está formada por núcleos y electrones. Sin embargo, se puede demostrar que en cuerpos de masa muy grande este estado electrónico "habitual" de la materia puede hacerse inestable. La razón se encuentra en el hecho de que el estado "electrónico" de la materia no conduce a densidades extremadamente grandes, porque a semejantes densidades los electrones forman un gas de Fermi cuya presión es inmensa. Por otro lado, es fácil ver que la materia puede pasar a otro estado que es mucho más compresible —el estado en el que todos los núcleos y electrones se combinan para formar neutrones.» Antes de que el artículo se publicase, David Shoenberg, un físico británico que permaneció en el Instituto de Problemas Físicos de Moscú y que solía comer con Landau, escribió una carta a Chandrasekhar a comienzos de noviembre de 1937 en la que resumía bien la aportación de Landau (Hufbauer 2007: 348):

Incidentalmente, Landau está muy excitado con una nueva teoría de la energía estelar que tiene y que aparecerá en Nature en una pocas semanas. Creo que escribirá acerca de ella pero, en caso de que no lo haga, la idea es que las estrellas tienen un núcleo de neutrones que aumenta a expensa de la combinación de núcleos y electrones (esta reacción emite energía). Creo que ha demostrado que este tipo de proceso se corresponde razonablemente bien con la luminosidad y masas de las estrellas, aunque no he entendido los detalles.Por cierto, él siempre se está quejando de los astrofísicos, a los que considera «patológicos» por realizar suposiciones irrazonables; le agradará saber (conociendo sus estándares tan elevados para científicos que no sean él) que dijo que ¡usted era uno de los menos dañinos!

Gamow, amigo de Landau, que había abandonado la Unión Soviética en 1933 instalándose finalmente en la Universidad George Washington de Estados Unidos, fue uno de los científicos que recibieron con atención el nuevo artículo. De hecho, él mismo también se había interesado por ese problema, como muestra el libro que había publicado en 1937: Structure of Atomic Nuclei and Nuclear Transformations (Gamow 1937). Allí sugirió que para estrellas suficientemente masivas, cuando todas las fuentes termonucleares de energía se hubiesen agotado, al menos en la masa central de la estrella, se formaría un

núcleo condensado de neutrones.

Y continuando con la historia llegamos a Robert Oppenheimer, un físico al que ya encontramos en el capítulo primero, experto en otro campo, el de la electrodinámica cuántica y dominios aledaños. Desde su época de estudiante posdoctoral en Caltech (1928), Oppenheimer había demostrado cierto interés por la astrofísica y la teoría de la relatividad general. Había mantenido buenas relaciones con Richard Tolman, profesor del Instituto Tecnológico, y uno de cuyos intereses era la astrofísica y la relatividad general, sobre la que publicó en 1934 un texto clásico, Relativity, Thermodynamics and Cosmology. Asimismo, había ayudado en ocasiones a Donald Mentzel, un astrofísico teórico del Observatorio Lick de la Universidad de California. Además, y al igual que en los casos de Landau y Gamow, la estructura de las estrellas constituía un buen escenario para aplicar los conocimientos cuánticos que él poseía.[125]

Desde que, tras sus periplos europeos, se instaló en California y, como ya tuve oportunidad de mencionar, dividió su tiempo entre Berkeley y Pasadena, Oppenheimer mostró interés en el trabajo que se hacía en el Observatorio de Monte Wilson. En 1933, dio una charla sobre «Estrellas y núcleos» en el Club de Física y Astronomía de Monte Wilson-Caltech, pero su interés en la astrofísica se vio avivado por uno de sus estudiantes de Berkeley, el canadiense, aunque nacido en Rusia, George Michael Volkoff, que dio una charla en Berkeley en 1937 sobre «La fuente de energía estelar».[126] El año siguiente, Oppenheimer organizó un simposio sobre «Transformaciones nucleares y su significado astrofísico» dentro de la reunión anual de la American Physical Society, que aquel año se celebró en San Diego. Poco tiempo después apareció el primero de tres de sus artículos dedicados a la astrofísica, en este caso una carta al editor escrita junto a Robert Serber, quien después de obtener su doctorado en la Universidad de Wisconsin, bajo la dirección de John van Vleck, se había trasladado a Berkeley para trabajar junto a Oppenheimer.[127] Tomando en cuenta algunos efectos de fuerzas nucleares, Oppenheimer y Serber (1938) calcularon la masa mínima necesaria para que se cumpliese la sugerencia de Gamow: la formación de un núcleo estable de neutrones en algunas estrellas (la estimaron en 0,1 veces la masa del Sol).

El segundo de estos artículos lo publicó junto a Volkoff. Se titulaba «Sobre núcleos masivos de neutrones» (Oppenheimer y Volkoff 1938) y, en parte, constituía un diálogo con las aportaciones previas de Landau, que se citaban. El resumen que acompañaba al artículo sirve para explicar su contenido:

Se ha sugerido que cuando la presión dentro de la materia estelar es lo suficientemente grande, se formará una nueva fase constituida por neutrones. En este artículo estudiamos el equilibrio gravitacional de masas de neutrones, utilizando la ecuación de estado de un gas de Fermi frío y la relatividad general. Para masas inferiores a MS/2 [la masa del Sol] solo existe una solución de equilibrio, que se describe de manera aproximada mediante la ecuación de estado no relativista de Fermi y la teoría gravitacional newtoniana. Para masas MS/3 < m < 3MS/4 existen dos soluciones, una estable y cuasi-newtoniana, y otra más condensada e inestable. Para masas superiores a 3MS/4, no existen soluciones de equilibrio.

Este artículo aportaba varias mejoras con respecto a los trabajos de Landau. En primer lugar, Oppenheimer y Volkoff se habían apoyado en la relatividad general, mientras que Landau lo había hecho en la mecánica newtoniana. Además, al encontrar que existían soluciones estables para ciertos límites de masa, demostraban que era posible que existiesen estrellas de neutrones.

Antes de pasar a comentar el tercer artículo, y como un breve aparte, quiero hacer notar un detalle que podría pasar desapercibido, el que el caso que estoy analizando muestra una de las características que, salvo excepciones (siempre las hay), se han mantenido a lo largo de la historia de la ciencia: su dimensión «comunal», esto es, que se trata de una empresa colectiva que supera fronteras nacionales. Oppenheimer construyó sus resultados teniendo bien presentes los que había obtenido Landau, del que le separaba una dura frontera política, la existente entre la Unión Soviética y Estados Unidos. Y entre medias estaba Gamow, que había abandonado aquel país para instalarse en los Estados Unidos.

El tercer artículo lo firmó Oppenheimer con un estudiante graduado de Berkeley, al parecer elegido por sus excepcionales habilidades matemáticas, Hartland Snyder (con bastante frecuencia los artículos de Oppenheimer, sólidos en cuanto a consideraciones físicas, contenían errores en los cálculos matemáticos). El 5 de febrero de 1939, Oppenheimer informaba a George Uhlenbeck del progreso de su contenido, aunque lo hacía al mismo tiempo que le comentaba, con más detalle y aparente mayor interés, otras cuestiones físicas (Smith y Weiner, eds. 1980: 209): «También aquí hemos estado trabajando sobre soluciones estáticas y

no estáticas para masas muy pesadas que han agotado sus fuentes nucleares de energía: viejas estrellas que acaso colapsan a núcleos de neutrones. Los resultados han sido muy extraños, y pronto se harán públicos, de manera que no me molestaré en explicarlos aquí».

El artículo, que completaron a finales de junio, apareció finalmente, en Physical Review. De nuevo utilizaré su resumen (Oppenheimer y Snyder 1939: 455):

Cuando todas las fuentes de energía termonucleares se agoten, una estrella suficientemente pesada colapsará. Y a menos que una fisión debida a la rotación, la emisión de materia, o el estallido de la masa a causa de la radiación, reduzca la masa de la estrella a una del orden de la del Sol, esta contracción continuará indefinidamente. En este artículo estudiamos las soluciones de las ecuaciones del campo gravitacional que describen este proceso. En I, se dan argumentos generales y cualitativos para el comportamiento del tensor métrico según progresa la contracción: el radio de la estrella se aproxima asintóticamente a su radio gravitacional; la luz emitida por la superficie de la estrella se enrojece progresivamente y puede escapar por un, cada vez más pequeño, rango de ángulos. En II, se obtiene una solución analítica de las ecuaciones de campo para el caso en el que se puede despreciar la presión en el interior de la estrella, que confirma estos argumentos generales. Para un observador que se mueva con la materia estelar, la duración total del colapso es finita, y del orden de un día para este caso idealizado y masas estelares típicas; un observador externo verá que la estrella se contrae asintóticamente a su radio gravitacional.

Cualquiera que haya seguido un curso de relatividad general y sepa algo de, al menos, la singularidad asociada a la solución de Schwarzschild, reconocerá en los pasajes anteriores muchos de los elementos de lo que sucede al traspasar el denominado «radio, u horizonte, de Schwarzschild» y, por consiguiente, de la teoría de agujeros negros. Sin embargo, el artículo de Oppenheimer y Snyder recibió muy poca atención, comenzando por su autor principal, más interesado en asuntos de física nuclear y electrodinámica cuántica A la postre, cuando se mira con la perspectiva que da el paso del tiempo, resulta que este artículo fue uno de los mejores que Oppenheimer publicó a lo largo de su carrera, pero todo indica que él nunca lo consideró de tal manera.

Pero estoy avanzando demasiado: todavía no podemos hablar de «agujeros negros». Por el momento basta con quedarnos con el hecho de que cuando Jocelyn Bell descubrió un nuevo tipo de radiofuente, ya se habían propuesto las ideas de estrellas de neutrones y la de la posibilidad de una contracción gravitacional imparable.[128] Establecido esto, volvamos a esas radiofuentes.

Los primeros modelos de estrellas de neutrones sugerían que el único tipo de radiación detectable que podrían emitir sería la radiación térmica de rayos X procedentes de su superficie. Sin embargo, en 1967, pocos meses antes del descubrimiento de Jocelyn Bell, el astrofísico italiano Franco Pacini (1939-2012) había publicado un artículo teórico, mientras trabajaba como profesor visitante en la Universidad de Cornell (permaneció allí hasta 1973, cuando regresó a Europa) en el que argumentaba que una estrella de neutrones con un fuerte campo magnético podía actuar como un generador eléctrico y emitir ondas de radio (Pacini 1967).

A lo largo del año que siguió al hallazgo de Bell, se detectaron más de 20 de estas radiofuentes —a las que se terminó denominando púlsares—, y hubo una avalancha de publicaciones con interpretaciones teóricas. La finalmente aceptada fue la que propuso Thomas Gold, uno de los «padres» de la cosmología del estado estacionario, reconvertido ya al modelo del Big Bang. Gold (1968) se dio cuenta de que los periodos tan pequeños implicados en las observaciones (del orden de 1 a 3 segundos en los primeros púlsares detectados) exigía una fuente de tamaño muy pequeño. Las enanas blancas eran demasiado grandes para rotar o vibrar con tal frecuencia, pero no así las estrellas de neutrones. Pero ¿el origen de las señales recibidas se debía a vibraciones o a rotaciones de estas estrellas? No a vibraciones, porque en estrellas de neutrones estas eran demasiado elevadas (alrededor de mil veces por segundo) como para explicar los periodos de la mayoría de los púlsares. Por consiguiente, los púlsares tenían que ser estrellas de neutrones en rotación. En la actualidad, cuando se han descubierto púlsares que emiten rayos X o gamma (incluso algunos, luz en el espectro óptico); también se admiten otros mecanismos para la producción de la radiación que emiten: por ejemplo, la absorción de materia en sistemas dobles.

II

NUEVA VIDA PARA LA RELATIVIDAD GENERAL

Abandonamos el avance de la relatividad general en el capítulo primero después de que dos de sus tres predicciones (el desplazamiento del perihelio de Mercurio y la curvatura de los rayos de luz) se hubieran verificado, y de que, a través de la solución exacta encontrada por Karl Schwarzschild en 1916, la teoría einsteiniana mostrase sus posibilidades para suministrar un marco teórico cosmológico (Lemaître, Friedmann). Durante la mayor parte de la primera mitad del siglo XX, y al menos en la primera década de la siguiente mitad, fueron las matemáticas y los matemáticos los que dominaron la investigación que desarrollaba la teoría que Einstein había culminado en noviembre de 1915. En los siguientes apartados revisaremos brevemente cuáles fueron las principales líneas por las que transitó esa investigación.

BÚSQUEDA DE UNA TEORÍA DEL CAMPO UNIFICADO

El dominio de aplicación de la teoría de la relatividad general era la interacción gravitacional, pero la gravitación no es la única fuerza que existe en el Universo; en la época en la que Einstein desarrolló su teoría se conocía perfectamente la existencia de otra, la electromagnética, pero todavía no se habían identificado, aunque existiesen indicios de ellas, las interacciones débil y fuerte. Era, por consiguiente, natural que Einstein, o alguna otra persona, se plantease incluir en el marco de la relatividad general al electromagnetismo; esto es, geometrizar (hacer que la métrica del espacio-tiempo las representase) no solo la fuerza gravitacional sino también la electromagnética. De hecho, esto es lo que había intentado hacer el matemático David Hilbert prácticamente al mismo tiempo que Einstein llegó a la formulación final de su teoría.[129]

Habida cuenta de que esa geometrización se llevaba a cabo utilizando el elemento básico de los espacios de Riemann, el tensor métrico, $g_{\alpha\beta}$, para describir el campo gravitacional, la pregunta era si sería posible utilizarlo también para incluir al electromagnetismo.[130] Y se encontró que no, que no poseía suficientes grados de libertad para ello, que era preciso ir más allá de los espacios de Riemann, generalizarlos. Y no fue Einstein, ni algún otro físico, el que tomó la iniciativa en este programa. Fueron los matemáticos. Estimulados por la aparición y el poder de la teoría de la relatividad general, algunos matemáticos analizaron los fundamentos de la geometría riemanniana. Así, en 1917 Gerhard Hessenberg, catedrático de Matemáticas en la Escuela Técnica de Breslau (Wroclaw, Polonia, en la actualidad), y el italiano Tullio Levi-Civita, entonces catedrático de Mecánica racional en Padua, publicaron sendos artículos en los que señalaban que la formulación natural de una geometría riemanniana se basaba en la noción de transporte paralelo infinitesimal de un vector, algo que también hizo al año siguiente el matemático holandés Jan Arnoldus Schouten.[131] Conociendo estos trabajos, en 1918 el alemán Hermann Weyl (1885-1955) resaltó que al transportar paralelamente un vector, el valor de su módulo (su «longitud») depende del camino que se sigue en tal transporte, de manera que para describir un espacio que tomase en cuenta tal propiedad era necesario introducir un nuevo conjunto de funciones; esto es, que no bastaba el tensor métrico para definirlo.

Weyl, un científico extremadamente interesante, un matemático permeable a la física y a la filosofía, disciplinas a las que también contribuyó de manera original, escogió para presentar sus ideas geométricas un libro cuyo título ya expresa su relevancia para el asunto que estamos tratando: Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie (Espacio-Tiempo-Materia. Conferencias sobre la teoría de la relatividad general; Weyl 1919). Con respecto a la generalización de la geometría riemanniana, Weyl (1952: 102) escribía en esta obra: «Inducido por las sólidas inferencias de la teoría de Einstein a examinar de nuevo los fundamentos matemáticos, el presente autor hizo el descubrimiento de que la geometría de Riemann solo llega a medio camino en lo que se refiere a alcanzar el ideal de una geometría infinitesimal pura. Todavía queda por erradicar el último elemento de geometría «a distancia», un residuo de su pasado euclidiano. Riemann supone que también es posible comparar las longitudes de dos elementos de línea en puntos diferentes del espacio; en una geometría «de lo infinitamente próximo» no es permisible utilizar comparaciones a distancia.

Consecuencia de la generalización geométrica introducida, el nuevo espacio (al que se suele denominar en la actualidad «espacios de Weyl») necesitaba para quedar definido el tensor métrico $g\alpha\beta$, pero también un cuadrivector, $\varphi\alpha$. Con estas nuevas cuatro variables, Weyl argumentaba que podía introducir, esto es, «geometrizar», el campo electromagnético.

Cuando Weyl informó a Einstein del contenido de sus investigaciones y le envió su libro, este quedó fascinado, aunque pronto encontró puntos de desacuerdo. Pero no olvidó la lección que el ejemplo del intento de Weyl implicaba: nuevas matemáticas, generalizaciones de los espacios riemannianos que había utilizado para la relatividad general, podían abrir el camino para resolver el problema que, siguiendo a Hilbert y a Weyl, él también asumió, encontrar una teoría geométrica unitaria de la gravitación y el electromagnetismo. Una tarea, por cierto, a la que también se unió pronto Arthur Eddington (1921), que profundizó en la línea abierta por Weyl y cuyas ideas influyeron bastante en Einstein.

Durante estos años, los primeros después de que Einstein completase la teoría de la relatividad general, las interacciones entre matemáticas, matemáticos y relatividad general no hacían sino crecer. Felix Klein (1849-1925), el patriarca de Gotinga, estaba entusiasmado por cómo la teoría de la gravitación einsteiniana (y también, de hecho, la teoría especial de la relatividad) resonaba con su célebre «Programa de Erlangen» (Klein 1872), la tesis que, influida por

los trabajos sobre la teoría de grupos continuos de Sophus Lie (1842-1899), planteó en la lección inaugural que pronunció al tomar posesión, en 1872, de una cátedra en la Universidad de Erlangen. La geometría, vino a decir entonces Klein, no es sino el estudio de los invariantes de un grupo de transformaciones; existen, en otras palabras, tantas geometrías como grupos de transformaciones, una perspectiva que permitía ver a la relatividad especial como una geometría lorentziana (invariante bajo las transformaciones de Lorentz), y a la relatividad general como la geometría del grupo de transformaciones generales. Confiado en sus habilidades, Klein se lanzó a investigar la relatividad general, inundando a Einstein con numerosas y, frecuentemente, extensas cartas.

También en Francia encontró eco la relatividad general, y en nada más y nada menos que Élie Cartan (1869-1951), uno de los líderes de la matemática gala, que a lo largo de su carrera cultivó dominios como los de la teoría de los grupos de Lie, la teoría de los espinores, sistemas de ecuaciones en derivadas parciales y teoría de espacios con conexiones lineales, realizando aportaciones fundamentales en algunos casos. El interés de Cartan por los trabajos de Einstein y la relación que mantuvo con este surgió de la siguiente manera.

Sabedor, a través sobre todo de los trabajos de Weyl, de las posibilidades que para geometrizar también el electromagnetismo tenía generalizar los espacios de Riemann, en 1928 Einstein (1928 a y b) presentó, separados por una semana (7 y 14 de junio), a la Academia Prusiana de Ciencias dos artículos con los que pretendía desarrollar una teoría del campo unificado, utilizando la noción de paralelismo a distancia. En estos artículos de Einstein no hay ninguna nota o mención que permita averiguar si las ideas matemáticas que utilizaba (y que se explicaban sobre todo en el primer trabajo) las había desarrollado él mismo o las había tomado de otros, aunque la manera en que se expresaba parece indicar que eran propias. Por entonces, sin embargo, existía una cierta literatura matemática (dominada por Élie Cartan y el estadounidense Luther P. Eisenhart) sobre la clase de espacios de Riemann que estaba utilizando Einstein, unos espacios que incluían además de la noción tradicional de curvatura, otra denominada «torsión», representada por un tensor antisimétrico. En aquellos espacios que la conexión es lineal, existen dos posibilidades: (a) si la torsión es igual a cero, pero no así la curvatura, el espacio en cuestión es el de Riemann; (b) si la curvatura es cero, pero no la torsión, se trata de un espacio con Fernparallelismus (paralelismo a distancia).

Al saber de estos trabajos de Einstein, Cartan le escribió el 8 de mayo de 1929:

[132] «En sus recientes artículos en el Sitzungsberichte dedicados a una nueva teoría de la relatividad generalizada, ha introducido usted la noción de Fernparallelismus en un espacio riemanniano. Ahora bien, la noción de un espacio riemanniano provisto de un Fernparallelismus es un caso especial de una noción más general, la de un espacio con una conexión euclidea, que yo esbocé brevemente en 1922 en un artículo en las Comptes Rendus (vol. 174, pp. 593-595), publicado cuando usted pronunció sus conferencias en el Collège de France; recuerdo incluso haber intentado, en casa de M. Hadamard, de darle a usted el ejemplo más simple de un espacio de Riemann con Fernparallelismus». A vuelta de correo, el 10 de mayo, Einstein admitía que Cartan tenía razón: «Veo, efectivamente, que las variedades que he utilizado son un caso especial de las estudiadas por usted». E inmediatamente mencionaba otros nombres: «Eisenhart en Princeton) y Weitzenböck (en Saar) también establecieron, parcialmente, los fundamentos matemáticos de mi teoría antes de que lo hiciese yo. Este último, en un artículo publicado en las actas de nuestra Academia, los Sitz. Ber. 1928, XXVI, ha dado una (supuestamente completa) bibliografía de trabajos matemáticos relevantes, pero ha pasado por alto el trabajo de usted». El matemático citado por Einstein, el austriaco Roland Weitzenböck, desde 1923 catedrático de Matemáticas en la Universidad de Ámsterdam, se había ocupado de los invariantes en teorías físicas a partir de 1913, y todo indica que estimulado por los últimos trabajos de Einstein se había unido al nuevo campo físico-matemático, publicando el artículo (Weitzenböck 1928) que el creador de la relatividad citaba y que incluía catorce referencias, pero ninguna de Cartan, para irritación de este.

Otra aproximación a la búsqueda de una teoría del campo unificado fue la que propuso un físico y matemático alemán de escasa pero fructífera obra en física (solo publicó en este campo cuatro artículos): Theodor Kaluza (1885-1954). En 1921, publicó un trabajo en el que presentaba una unificación de gravitación y electromagnetismo basada en un espacio de cinco dimensiones (Kaluza 1921), que recibió una pronta y favorable reacción de Einstein, quien, en colaboración con uno de sus ayudantes, Jakob Grommer, publicó inmediatamente un artículo basado en aquel (Einstein y Grommer 1923). «Su teoría cautiva realmente», le escribía el 9 de diciembre de 1921, un día después de que el trabajo de Kaluza apareciera. «Debe haber alguna verdad en él.»[133] Y conservó el suficiente interés en semejante enfoque como para tres lustros más tarde, ya instalado en Princeton, publicar con otro de sus ayudantes, Peter Bergmann, una generalización de la teoría de Kaluza (Einstein y Bergmann 1938).[134] No fue, sin embargo, en el dominio de la relatividad general donde la teoría de Kaluza

tuvo mayor repercusión, sino en otro tipo de unificación: entre la teoría cuántica y la relatividad. Ello se debió en realidad a Oskar Klein, que publicó en 1926 un artículo (Klein 1926) aplicando las cinco dimensiones de Kaluza a semejante propósito, aunque finalmente, y como en el caso de la unificación de gravitación y electromagnetismo, sin demasiado éxito.

Incluso el creador de la mecánica ondulatoria, Erwin Schrödinger, se interesó por las teorías del campo unificado, al que dedicó esfuerzos a partir de 1943, utilizando técnicas matemáticas no demasiado diferentes a las que habían inspirado a Eddington y a Weyl.[135]

ALBERT EINSTEIN: LA IRRESISTIBLE ATRACCIÓN DE LAS MATEMÁTICAS [136]

Antes de continuar con «la matematización de la relatividad», y como una especie de interludio, me detendré a analizar el hecho de que a partir de un determinado momento Einstein decidiese centrar en la heurística matemática sus investigaciones en busca de una teoría del campo unificado.[137] Lo más sorprendente de esto es que había iniciado su carrera como buen seguidor de la filosofía de Ernst Mach (debemos construir nuestras teorías científicas en base a aquello que podemos observar y medir directamente), edificando la teoría de la relatividad especial en base «operacionalista» (por ejemplo: solo podemos entender qué es el tiempo definiendo cómo lo miden dos observadores separados por una cierta distancia). Sin embargo, terminó sucumbiendo al poder de la matemática como guía heurística para la física teórica, aunque, bien es cierto, nunca olvidó que el juez último de una teoría física es siempre la experiencia. De hecho, se puede decir que, en lo que se refiere a su relación de madurez con las matemáticas, Einstein recuperó sensaciones —que prácticamente todo físico teórico habrá sentido en algún momento— que ya había experimentado cuando tenía doce años, momento en que, como recordó en sus Notas autobiográficas, cayó en sus manos un librito sobre geometría euclídea. «Había allí asertos», recordaba entonces (Einstein 1949: 15-17), «como la intersección de las tres alturas de un triángulo en un punto, por ejemplo, que —aunque en modo alguno evidentes— podían probarse con tanta seguridad que parecían estar a salvo de toda duda. Esta claridad, esta certeza, ejerció sobre mí una impresión indescriptible». Y enseguida añadía: «Si bien parecía que a través del pensamiento puro era posible lograr un conocimiento seguro sobre los objetos de la experiencia, el “milagro” descansaba en un error. Mas, para quien lo vive por primera vez, no deja de ser bastante maravilloso que el hombre sea siquiera capaz de lograr, en el pensamiento puro, un grado de certidumbre y pureza como el que los griegos nos mostraron por primera vez en la geometría».

Lo de «si bien parecía que a través del pensamiento puro era posible lograr un conocimiento seguro sobre los objetos de la experiencia, el “milagro” descansaba en un error», es, a todas luces, un anacronismo: esto es lo que Einstein había terminado creyendo (con razón), no lo que, más que probablemente, pensó cuando descubrió los resultados de la geometría de

Euclides. De hecho, el redescubrimiento del poder de las matemáticas que llevó a cabo de la mano de la teoría de la relatividad general, el que a partir de un cierto momento, en torno a 1920, no encontrase más guía heurística para proseguir su búsqueda de una teoría del campo unificado, que tan importante era para él (creía que podía conducir a una alternativa causal para la mecánica cuántica, a la que se oponía firmemente); ese redescubrimiento del poder de la matemática, digo, le condujo a defender opiniones como la que expuso durante la conferencia Herbert Spencer que pronunció en Oxford el 10 de junio de 1933 (Einstein 1933, 2000: 245-246):

Si es verdad [...] que la base axiomática de la física teórica no puede ser extraída de la experiencia y debe ser inventada con libertad, ¿podemos esperar que alguna vez hallemos el camino correcto? [...] Sin ninguna vacilación responderé que, según mi opinión, existe un camino correcto y que nosotros somos capaces de hallarlo.

Hasta el momento presente nuestra experiencia nos autoriza a creer que la naturaleza es la realización de las ideas matemáticas más simples que se pueda concebir. Estoy convencido de que, por medio de construcciones matemáticas, podemos descubrir los conceptos y las leyes que los conectan entre sí, que son los elementos que proporcionan la clave para la comprensión de los fenómenos naturales. La experiencia puede sugerir los conceptos matemáticos apropiados, pero estos, sin duda ninguna, no pueden ser deducidos de ella. Por supuesto que la experiencia retiene su cualidad de criterio último de la utilidad física de una construcción matemática. Pero el principio creativo reside en la matemática. Por tanto, en cierto sentido, considero que el pensamiento puro puede captar la realidad, tal como los antiguos habían soñado.

Largo y variado había sido el camino intelectual que había recorrido el gran maestro de la ciencia del siglo XX cuando realizó estas manifestaciones. Leídas con atención contienen la esencia de su vida como pensador, la vida de una persona que sacrificó el método a la posibilidad de describir la naturaleza, fuesen las que fuesen las herramientas que se viese obligado, o animado, a utilizar. Los procedimientos —los métodos— que en ocasiones empleó debieron mucho a venerables ideas filosóficas, a la filosofía, dando también lugar a nuevos planteamientos filosóficos. Pero entre esos métodos, la matemática llegó a desempeñar un papel central durante un largo periodo de su carrera. Ahora bien,

todos esos planteamientos, los filosóficos o los matemáticos, siempre estuvieron dirigidos a servir a la física, a la ciencia que busca desentrañar cuáles son las leyes básicas a las que obedecen los fenómenos que observamos en la naturaleza.

OTROS MATEMÁTICOS «RELATIVISTAS»

Además de los matemáticos ya citados, que mantuvieron una relación más o menos directa con la búsqueda de una teoría del campo unificado, es obligado mencionar otros que dedicaron, al menos, una parte de sus investigaciones al campo de la relatividad general, esfuerzos que, como apunté, dominaron una buena parte de la atención que se dedicó a la teoría de la gravitación einsteiniana durante décadas.

Uno de esos matemáticos fue el francés André Lichnerowicz (1915-1998), autoridad mundial en el campo de la geometría diferencial. «Trabajé en el campo de la relatividad desde 1937 hasta 1967», recordaba Lichnerowicz (1992: 103) en un artículo: «En 1937, la comunidad de relativistas era una extraña mezcla. Existía un pequeño grupo de físicos especializados en ella, amigos o estudiantes de Einstein, tales como W. Pauli, L. Infeld, B. Hoffman y V. Fock (URSS); y un pequeño grupo de astrónomos especializados, como G. Lemaître; y un pequeño grupo de matemáticos, como T. de Donder y G. Darmois.[138] Sus intereses oscilaban entre la geometría diferencial y la mecánica racional, pasando por la teoría de ecuaciones en derivadas parciales. La comunidad de físicos de entonces, apasionadamente dedicada a la mecánica cuántica, consideraba a los relativistas como marginales. Solo P. Dirac era una excepción. Esta situación se mantuvo hasta 1955 y el Coloquio de Berna presidido por Pauli». En la misma publicación, Lichnerowicz (1992: 104) explicaba cómo había llegado a interesarse por la relatividad:

En 1936 y 1937, después de haber recibido una sólida formación en geometría diferencial de Élie Cartan, y siguiendo el consejo de George Darmois y con la anuencia de Cartan, me interesé en la teoría de la relatividad. En 1926, Darmois había dado un curso de cuatro lecciones en Bélgica sobre «las ecuaciones de la gravitación einsteiniana», en presencia de Donder. La versión publicada (Darmois 1927), que apareció en la serie Mémorial des Sciences Mathématiques, se convirtió en mi lectura de cabecera. En ese libro, aunque tratado en coordenadas gaussianas, que en mi opinión presentaban serios problemas, se encuentra el primer análisis riguroso de la naturaleza hiperbólica de las

ecuaciones de Einstein; esto es, el fundamento de la teoría relativista de la gravitación como una teoría de propagación de ondas. Se estudiaba, con un profundo conocimiento, la separación de las ecuaciones de Einstein relativas al problema de Cauchy en dos grupos: uno trataba de las condiciones iniciales, y el otro de la evolución temporal. Una interpretación geométrica de las condiciones de las coordenadas de Donder, se conoce ahora como condiciones armónicas.

Fue entonces cuando comencé a pensar sobre la estructura diferenciable de la variedad espacio-temporal, de manera que pudiese atacar lo que me interesaba: los problemas globales de la relatividad, las claves para la verdadera comprensión de la teoría. En 1939, sintiendo que la guerra estaba cerca, publiqué en la serie Actualités Scientifiques et Industrielles una monografía algo imperfecta titulada Problèmes globaux en mécanique relativiste (Lichnerowicz 1939). Después de haber analizado de manera completa el problema formal de Cauchy para coordenadas locales arbitrarias, di la primera demostración (parcial) de un resultado que habían buscado Einstein y Pauli: un espacio-tiempo exterior estacionario, regular y asintóticamente euclídeo en todos sus puntos, debe ser plano localmente; esto es, sin gravitación. Di una demostración completa de este teorema en 1945, que me ganó la felicitación de Pauli.

Los problemas que mencionaba aquí Lichnerowicz eran, por supuesto, interesantes y relevantes, pero sobre todo desde el punto de vista de la estructura matemática de la teoría de la relatividad general, no desde el de las posibles consecuencias o contrastaciones experimentales, físicas. De hecho, cabe argumentar que acaso sirvieran más al avance de ciertas ramas de la matemática pura que a la física, aunque indudablemente también sirvieron a esta. Algo de esto posiblemente tenía en mente el matemático chino-americano Shiing-Shen Chern, considerado como uno de los grandes nombres de la geometría diferencial del siglo XX, cuando en una reseña de uno de los libros de Lichnerowicz, Théorie globale des connexions et des groupes d’holonomie (1955), señaló (Chern 1957: 57): «Este libro, dedicado a la teoría moderna de las conexiones, es muy adecuado al momento actual. La teoría clásica la iniciaron sobre todo Levi-Civita y Schouten, y recibió un amplio desarrollo, en parte, por sus aplicaciones a la teoría general de la relatividad».

Otro punto que quiero destacar es que problemas (matemáticos) de este tipo, ya no pertenecientes al cada vez más caduco de la unificación de gravitación y

electromagnetismo, continuaron abarcando durante bastante tiempo la investigación en el campo de la relatividad general. Lichnerowicz, autor de textos muy utilizados, como Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnetisme (Lichnerowicz 1955), contribuyó a esa tendencia, pero no solo él: también hay que mencionar a, por ejemplo, Yvonne Choquet-Bruhat (n. 1923), una de sus doctorandos y la primera mujer en ser elegida miembro de la Académie des Sciences (que en el pasado había rechazado a Marie Curie). Autora de textos como Distributions. Théorie et problèmes (1973), Géométrie différentielle et systèmes extérieures (1968) o General Relativity and the Einstein Equations (2009), que estudiaron numerosos físicos que harían de la relatividad general y de la teoría de campos su especialidad, Choquet-Bruhat presidió entre 1980 y 1983 el Comité Internacional de relatividad general y gravitación, disciplina en la que su mayor contribución fue la demostración de la existencia local y unicidad de las soluciones de las ecuaciones de Einstein en el vacío (Choquet-Bruhat 1952), cuestión que ya había abordado en su tesis doctoral (1951).[139]

LA RELATIVIDAD, UNA FÍSICA «POCO INTERESANTE»

En una de las citas de Lichnerowicz que he utilizado anteriormente, este manifestaba que «la comunidad de físicos de entonces, apasionadamente dedicada a la mecánica cuántica, consideraba a los relativistas como marginales. Solo P. Dirac era una excepción. Esta situación se mantuvo hasta 1955 y el Coloquio de Berna presidido por Pauli». El coloquio en cuestión se celebró entre el 11 y el 16 de julio de 1955, como un homenaje a los cincuenta años del nacimiento de la teoría de la relatividad, cuya primera parte, la teoría especial, la creó Einstein en 1905 cuando vivía en Berna. Las actas de aquella reunión nos pueden servir, por consiguiente, para hacernos una idea de la justicia, o injusticia, de las afirmaciones de Lichnerowicz. Pero antes utilizaré otro indicador para evaluar los temas de investigación predominantes en el mundo relativista: el contenido del número que la prestigiosa revista estadounidense Reviews of Modern Physics dedicó a Einstein en julio de 1949 para celebrar el septuagésimo cumpleaños del gran físico.

Se abría aquel número con un artículo de Robert Millikan («Albert Einstein in his seventieth birthday»), al que seguían otros de carácter general de Louis de Broglie, Max von Laue y Philipp Frank. Los restantes se pueden clasificar en los grupos siguientes:

(1) Relatividad especial (teoría): H. P. Robertson, P. A. M. Dirac, A. D. Fokker, O. Klein.

(2) Relatividad general (teoría): L. Infeld y A. Schild, N. Rosen.

(3) Teorías de campo unificado: E. G. Straus.

(4) Cosmología (teoría): G. Lemaître, G. Gamow, R. C. Tolman, K. Gödel.

(5) Física cuántica, teoría de campos y partículas elementales: A. H. Taub, T. D. Newton y E. P. Wigner, J. A. Schouten, W. Pauli y F. Villars, A. Pais y S. T. Epstein, H. J. Bhabha, M. Born, H. Yukawa, P. G. Bargmann y J. M. Brunings, V. Bargmann.

(6) Física matemática: G. Racah, C. Lanczos, O. Stern, B. Hoffmann.

(7) Hidrodinámica: R. Ladenburg y D. Bershader, Th. Von Kármán y C. C. Lin, Hans Albert Einstein y El-Sayed A. El-Samni, W. J. de Haas y G. van den Berg.

(8) Química cuántica: J. Frank y R. Livingston , K. F. Herzfeld.

(9) Astrofísica y rayos cósmicos: S. Chandrasekhar, M. S. Vallarta.

(10) Electrodinámica clásica: J. A. Wheeler y R. P. Feynman.

Una conclusión inmediata que se puede extraer de la anterior lista es que a la hora de celebrar a Einstein, el mayor número de contribuciones pertenecía al dominio de la física cuántica, no al de la relatividad. Si se trataba de honrar a la ciencia a la que Einstein dedicó su vida, la distribución era apropiada dado el vigor de la investigación en la física cuántica. Pero, de los artículos de relatividad, incluyendo la cosmología relativista, que aparecieron en aquel número de Reviews of Modern Physics solo uno ha sobrevivido al paso del tiempo. ¡Y no lo escribió un físico, sino un lógico matemático, Kurt Gödel! Se titulaba «Un ejemplo de un nuevo tipo de soluciones cosmológicas a las ecuaciones del campo de la gravitación de Einstein» (Gödel 1949). En la «nota introductoria» que acompaña a la reproducción de este artículo, en uno de los tomos de las obras completas de Gödel, el muy conocido físico e introductor de los agujeros negros Stephen Hawking (1990: 189) explicó bien el interés de la cosmología introducida por el gran lógico checo: «Gödel presentó una solución en rotación que no se expandía, pero que era la misma en todos los puntos del espacio y el tiempo. Esta solución fue la primera que se descubrió que tenía la curiosa propiedad de que en ella era posible viajar al pasado. Esto conduce a paradojas tales como: “¿Qué sucede si usted viaja al pasado y mata a su padre cuando era un niño?”. Se acepta en general que esto no puede suceder en una solución que represente nuestro Universo, pero Gödel fue el primero en demostrar que esto no está prohibido por las ecuaciones de Einstein. Su solución generó una gran discusión sobre las relaciones entre la relatividad general y el concepto de causalidad».

Pasemos ahora a las actas del congreso de Berna de 1955 (Einstein había fallecido poco antes, el 18 de abril), que posee un interés añadido, porque es considerado como el Congreso cero, GR0, de los Congresos Internacionales de Relatividad General y Gravitación, siendo el primero, GR1, el que tuvo lugar en

Chapel Hill, del 18 al 23 de enero de 1957 (ya nos ha aparecido anteriormente esta reunión).

Se presentaron 35 comunicaciones, de las que solo dos (W. Baade y J. Trumpler) estuvieron dedicadas a observaciones, siendo el resto de los temas los siguientes (Mercier y Kervaire, eds. 1956):

(1) «Detalles teóricos sobre cuestiones cosmológicas»: M. von Laue, O. Heckmann y E. Schücking, H. P. Robertson, O. Klein, F. Hoyle, H. Bondi.

(2) «Detalles teóricos y matemáticos sobre la relatividad especial o la general»: A. Alexandrov, J. Titts, J. van Dantzig, C. Moller, O. Klein, H. Bondi, J. Géhéniau y R. Debever, A. Papapetrou, W. H. McCrea, E. Corinaldesi, W. Scherrer, P. Jordan, G. Ludwig y K. Just, N. Rosen, A. Lichnerowicz, M. A. Tonnelat, F. Pirani, V. Fock (2 artículos), L. Infeld.

(3) «Aspectos teóricos de las teorías del campo unificado»: Y. Fourès-Bruhat y B. Kaufman.

(4) «Relatividad y mecánica cuántica»: P. G. Bergmann, O. Costa de Beauregard y E. Wigner.

Más dos artículos de asuntos generales: O. Costa de Beauregard («Complémentarité et relativité») y M. Born («Physics and relativity»).

Visto retrospectivamente, la mayoría de aquellos temas no contribuyeron demasiado a lo que la ciencia aspira: a desvelar el funcionamiento o contenidos de la naturaleza, por mucho que entonces atrajesen la atención de excelentes científicos.

Algo más interesante fue el congreso GR1, el celebrado en la Universidad de North Carolina, Chapel Hill, del 18 al 23 de enero de 1957, al que, de hecho, ya me he referido dos veces en el presente capítulo.[140] Tal interés deriva del hecho de que los organizadores de la reunión eran conscientes de la situación de estancamiento parcial en que se encontraba la investigación en relatividad general. Cécile M. DeWitt, editora de las actas de la reunión, lo expresaba en el

prólogo (DeWitt 1957): «La investigación en la teoría de la gravitación ha sido relativamente desatendida en las dos o tres últimas décadas debido a varias buenas razones: (1) la falta de referencias experimentales, (2) las dificultades matemáticas que se han encontrado en el estudio de campos no lineales, y (3) la experiencia de tempranos y repetidos intentos de extender la teoría de la relatividad general». A pesar de ello, según DeWitt «recientemente había comenzado a desarrollarse un renovado interés en el tema, y la conferencia de Chapel Hill dio una oportunidad a los pocos físicos que trabajan activamente en el campo —algunos han mantenido un interés en él a pesar de sus dificultades, otros se han implicado recientemente en su estudio, a menudo desde un nuevo punto de vista— para discutir resultados preliminares obtenidos y para presentar nuevas líneas de investigación».

Robert Dicke, al que ya hemos mencionado a propósito del descubrimiento del fondo de radiación de microondas, insistió en su intervención (titulada «La base experimental de la teoría de Einstein»; fue la segunda comunicación del congreso) en lo que DeWitt había señalado: «Es desafortunado advertir que la situación con respecto a las pruebas experimentales de la teoría de la relatividad general no es mucho mejor de lo que era unos años después de que la teoría fuese descubierta, digamos en 1920. Esta situación contrasta notablemente con la de la teoría cuántica, donde disponemos de, literalmente, miles de pruebas experimentales. La relatividad parece ser casi un formalismo puramente matemático, que tiene poca relación con los fenómenos observados en el laboratorio. Constituye un gran reto para los físicos experimentales intentar mejorar esta situación; tratar de diseñar nuevos experimentos y refinar los antiguos para suministrar nuevas comprobaciones a la teoría».

La primera parte de la conferencia estuvo dedicada a la teoría clásica, mientras que en la segunda se trató de la cuantización de la relatividad general. Es difícil resumir lo tratado en el congreso, debido a que las presentaciones generales estuvieron acompañadas de un elevado número de pequeñas intervenciones y discusiones. Diré, no obstante, que en la primera parte dominaron presentaciones y discusiones teóricas, en el fondo no muy diferentes de las que se habían escuchado en Berna dos años antes. André Lichnerowicz, por ejemplo, habló largo y tendido sobre «La integración de las ecuaciones de Einstein». Herman Bondi abrió una sesión dedicada a la radiación gravitacional, un problema que ocupaba una buena parte de las energías del grupo que encabezaba en el Departamento de Matemáticas del King’s College de Londres.

La radiación gravitacional —esto es, si se producen ondas debido a variaciones del espacio-tiempo, y si esa radiación lleva asociada, como en el caso del electromagnetismo maxwelliano, una pérdida de energía del sistema emisor—, fue una cuestión que Einstein (1916 a) consideró muy pronto, en un artículo que publicó en 1916 («Integración aproximada de las ecuaciones del campo gravitacional»). Se trataba de un problema muy difícil: por un lado estaba la cuestión de definir de forma invariante el concepto de energía y, por otro, el de disponer de soluciones exactas de las ecuaciones del campo gravitacional que representasen ondas gravitacionales (en 1916, Einstein únicamente trabajó con soluciones aproximadas). Entre los que trataron del tema en Chapel Hill se encontraba Joseph Weber, quien durante décadas se esforzaría en detectar tales ondas, aunque en aquella ocasión únicamente se refirió a aspectos teóricos (ni siquiera estaba claro qué se quería decir con «radiación gravitacional», como muestra el que Felix Pirani —miembro del grupo londinense de Bondi— intentase «formular una definición de radiación gravitacional de forma invariante», algo obligado en una teoría como la relatividad general, uno de cuyos principios básicos es el principio de relatividad general).[141] Volveré a la radiación gravitacional más adelante.

En esta primera parte de las actas aparecía la, a la postre, única presentación perteneciente al dominio observacional, debida a Edward Lilley («Medidas radioastronómicas de interés para la cosmología»). Se lee en ella, «Con el descubrimiento de la radiación en la frecuencia radio de origen galáctico en 1932 por Karl Jansky, la nueva ciencia de la radioastronomía ha madurado con rapidez y ya ha producido medidas que son de interés para los cosmólogos».

La segunda parte estuvo dedicada a la cuantización de la relatividad general, un problema, podríamos decir, sempiterno, que ni siquiera hoy ha sido resuelto. Aparece en las actas una tan variada, como apretada, sucesión de exploraciones de posibilidades, unas basadas en el método hamiltoniano de Dirac (ver cómo en la gravitación se podían convertir los hamiltonianos clásicos en operadores sujetos a las reglas cuánticas), otras en el lagrangiano de Schwinger, o en el de las integrales de caminos de Feynman. El propio Richard Feynman participó en la reunión, y lo hizo, como habitualmente hacía, de manera intensa. Justo antes de que Peter Bergmann cerrase la reunión con un resumen de la misma, Feynman realizó una serie de comentarios críticos, que posteriormente amplió con un suplemento que se añadió al volumen de las actas. Merece la pena citar los comentarios de tipo general que hizo allí Feynman, tanto sobre el problema de la cuantización de la gravitación como sobre la teoría de la relatividad

general:

Existe una seria dificultad [con la relatividad general], y esta es la ausencia de experimentos. Más aún, no vamos a disponer de más experimentos de manera que debemos adoptar un planteamiento que nos permita tratar con problemas cuando no se dispone de experimentos. Hay dos posibilidades. La primera es la del rigor matemático. Aquellos que trabajan en la teoría gravitacional creen que las ecuaciones son más difíciles que las de cualquier otro campo, y en mi opinión esto es falso. Si me piden que resuelva las ecuaciones, debo decir que tampoco puedo resolverlas en otros campos. Sin embargo, uno puede hacer mucho mediante diversas aproximaciones que no son rigurosas y que no se han probado matemáticamente, acaso durante los primeros años. Históricamente, el análisis riguroso de si lo que uno dice es cierto o no surge muchos años después del descubrimiento de aquello que es correcto. Y el descubrimiento de lo que es cierto se ve ayudado por experimentos. Intentar dar con soluciones matemáticas rigurosas sin experimentos que nos guíen es exactamente la razón por la que el problema es difícil, no las ecuaciones.

El segundo curso posible de acción es «jugar» [play games] mediante la intuición y seguir adelante. Tomemos el caso de la radiación gravitacional. La mayor parte de la gente cree que es probable que se emita esta radiación. Por tanto, supongamos que así es, y calculemos varias cosas, tales como la difusión [scattering] producida por estrellas, etc., y continuemos hasta que lleguemos a una inconsistencia. Entonces, volvamos atrás y busquemos cuál es la dificultad. Decidamos cuál es, y calculemos sin rigor de manera tentativa. No tenemos nada que perder: no existen experimentos. Creo que la mejor aproximación es pretender que existen experimentos y calcular. Como en este campo no nos impulsan los experimentos, nos debe impulsar nuestra imaginación.

La cuestión suscitada durante los tres últimos días no tiene que ver con la gravitación en sí misma, sino con la relación de la gravitación con el resto de la física. Tenemos:

gravedad-electrodinámica-teoría cuántica-física nuclear-partículas extrañas

El problema de la física es juntarlas a todas. El problema original después del descubrimiento de la gravedad era reunir la gravedad y el electromagnetismo, puesto que eso era esencialmente todo lo que se conocía. En consecuencia, tuvimos las teorías del campo unificado. Después de la teoría cuántica, uno trata de cuantificar la gravedad. Por lo que se refiere a los dos métodos de cuantización [el de Heisenberg y el de Schrödinger], creo que si uno funciona también lo hará el otro. El problema crucial es saber cuándo hemos tenido éxito en cuantizar el campo gravitacional. Deberíamos adoptar la misma actitud que en otras ramas de la física y calcular los resultados de algunos experimentos. No disponemos de los experimentos y por consiguiente no sabemos qué resultados calcular. Sin embargo, si alguien proporciona un resultado experimental, ¿podríamos comprobarlo? Ciertamente, podemos tomar una aproximación lineal y la respuesta será correcta o no. La importancia de hacer hincapié en experimentos se puede ver en el caso de la electrodinámica cuántica que se desarrolló en 1928, pero que estaba repleta de dificultades, tales como los niveles de energía infinita del átomo de hidrógeno. Cuando Lamb descubrió que la separación entre dos niveles es finita, Bethe se puso a trabajar, calculó la diferencia e introdujo las ideas de renormalización. Sabíamos que el número era finito, pero alguien lo midió y entonces forzó a que se calculase. El verdadero reto es, no encontrar un formalismo elegante, sino resolver una serie de problemas cuyos resultados se pueden someter a prueba. Este es un punto de vista diferente. No sea tan riguroso, o no tendrá éxito.

Los comentarios de Feynman son particularmente interesantes porque constituyen manifestaciones de lo distintas que eran en aquel momento las «culturas» de la investigación en la física de la gravitación (relatividad general), por una parte, y en el microcosmos cuántico, por otra. A falta de contactos con los experimentos, la investigación en el campo relativista se centraba en la cultura del rigor matemático, mientras que en el dominio cuántico, en el que proliferaban los experimentos, el rigor se dejaba de lado... al menos durante algún tiempo; más aún, la idea de lo que era riguroso o no estaba sometida a revisión, como muestra el caso de la renormalización, un procedimiento que muchos físicos considerarían no riguroso y, por consiguiente, no aceptable.

De todas maneras, a Feynman no debió defraudarle demasiado la experiencia de Chapel Hill, puesto que aceptó participar en el tercer Congreso Internacional de Relatividad General y Cosmología (GR3), que se celebró en Varsovia y Jablona

(Polonia), del 25 al 31 de julio de 1962.[142] En una carta que escribió a su esposa, Gweneth, desde el Gran Hotel de Varsovia, Feynman (2006: 147) se refirió al congreso de manera no muy favorable:

No voy a sacar nada de la reunión, no estoy aprendiendo nada. Este campo no es un campo activo (pues no hay experimentos), y pocos de los mejores hombres están trabajando en él. El resultado es que hay un montón (126) de pasmarotes aquí y eso no es bueno para mi presión arterial. Se dicen y se discuten seriamente cosas inanes —y yo me enzarzo en discusiones fuera de las sesiones formales, por ejemplo en la comida, cuando alguien me hace una pregunta o empieza a hablarme de su «trabajo»—. Siempre es o bien (1) completamente incomprensible, o (2) vago e indefinido, o (3) algo correcto que es obvio y evidente pero calculado mediante un análisis largo y difícil y presentado como un descubrimiento importante, o (4) una afirmación, basada en la estupidez del autor que dice que algo obvio y correcto, aceptado y comprobado durante años, es de hecho falso (estos son los peores... ningún argumento convencerá a los idiotas...) (5) un intento de hacer algo probablemente imposible, pero con certeza de ninguna utilidad y que, finalmente, se revela, al final falla [...], (6) solo es falso. Hay mucha «actividad en el campo» estos días, pero esta «actividad» consiste principalmente en mostrar que la «actividad» previa de algún otro terminó en un error o en nada útil, o en algo prometedor, etc., como un montón de gusanos tratando de salir de una botella arrastrándose sobre los demás. No es que la materia sea difícil, es simplemente que los buenos están ocupados en otro lugar. Recuérdame que no vaya a más congresos sobre gravedad.

Lo que decía a su esposa, opiniones que desarrollan algunas ideas que ya había expresado en Chapel Hill (en particular, la dificultad de conectar con experimentos), refuerzan la tesis que estoy defendiendo: el estancamiento que la investigación en la física relativista padeció durante décadas. Ahora bien, hay que introducir matices en la idea que las citas anteriores transmiten acerca de las opiniones de Feynman, matices que aparecen en los siguientes comentarios de Bryce DeWitt, que asistió a las reuniones de Chapel Hill y Polonia:[143]

Seguramente puedo simpatizar con la reacción de Feynman a la conferencia de Varsovia, porque yo tuve sentimientos parecidos. (Le recuerdo vivamente dando rienda suelta a su frustración allí poniendo a Ivanenko como un trapo, como nunca he oído.) Pero quienes publican su carta privada [la que acabo de citar a su esposa; JMSR] sin ofrecer la imagen completa, prestan un mal servicio a la verdad histórica. Aunque pensó que algunas de las discusiones en la conferencia de Chapel Hill no tenían sentido (lo mismo que pensaba yo), creo que lo pasó razonablemente allí. Le recuerdo muy interesado cuando demostré que sus integrales de camino en una configuración espacial curva conducen a la ecuación de Schrödinger con un término escalar de Ricci en ella. Las personas que asistieron a aquella conferencia (tales como Bondi, Hoyle, Sciama, Møller, Rosenfeld, Wheeler) no eran estúpidas y hablaron con él inteligentemente. (Yo había escogido personalmente los participantes; fue una conferencia cerrada.) Seguramente, la experiencia de Feynman en Chapel Hill había tenido algo que ver con su disposición a aceptar la invitación de Varsovia (que fue una conferencia abierta). Incluso en Varsovia, él y yo tuvimos discusiones fuera de la sesión formal que intento no creer que, honestamente, él pudo haber incluido en una de las seis categorías de su carta.

Probablemente, lo correcto es interpretar las poco favorables manifestaciones de Feynman acerca de la investigación en relatividad general como válidas para los dominios más clásicos de la teoría einsteiniana, como ecuaciones de movimiento, ondas y radiación gravitacional, soluciones exactas de las ecuaciones del campo, etcétera, en las que, efectivamente, la conexión con los datos experimentales era escasa. Otra cosa era el intento de encontrar una teoría cuántica de la gravitación, que podía, o no, significar cuantificar la teoría de la relatividad general. A la tarea de buscar una teoría cuántica de la gravitación Feynman dedicó algunos años, especialmente en la década de 1960. En el congreso de Polonia de 1962, dio una conferencia titulada «Teoría cuántica de la gravitación» que luego se publicó, en base a la grabación que se hizo de ella, en la revista Acta Physica Polonica (Feynman 1963). Poco después del congreso polaco, dentro del curso académico 1962-1963, Feynman comenzó en Caltech un curso de 27 lecciones (una cada semana) para estudiantes graduados avanzados y estudiantes posdoctorales, dedicado a la gravitación. Allí desarrolló una teoría cuántica de campos en la que el cuanto asociado al campo era una partícula, el denominado gravitón, sin masa y con espín 2 (el fotón, recordemos, tiene masa nula y espín ½) y en la que el campo estaba acoplado al tensor de

energía-momento del sistema.[144] Utilizando varios recursos, fue capaz de demostrar que, si era consistente, esa teoría conducía inevitablemente a la teoría general de la relatividad. Con esa idea en mente, intentó desarrollarla a la manera perturbativa (es decir, basada en series de aproximaciones) y renormalizable, procedimientos que tan bien funcionaban en la electrodinámica cuántica que él mismo había elaborado. Según Hatfield (1995: xxxi): «[Feynman] me dijo en 1980 que había pensado durante la década de 1950 que las consecuencias de la gravedad cuántica podrían ser "un trozo de pastel" a desarrollar. Después de todo, la gravedad es realmente débil. Siguiendo el éxito espectacular de la electrodinámica cuántica perturbativa, pensó que, esencialmente, no sería necesario desarrollar nada más allá del primer orden de aproximación. Por supuesto, esperaba que existiesen dificultades para definir una teoría cuántica consistente (por ejemplo, la dimensión de la constante gravitacional [G] es un obstáculo para la renormalización). Sin embargo, su idea fue no intentar [buscar] una cuantización completa y consistente y después calcular los resultados, sino ir en otra dirección; esto es, calcular las amplitudes perturbativas para procesos concretos, tales como la difusión Compton producida por un gravitón». Sin embargo, finalmente la teoría se mostró no renormalizable y Feynman abandonó sus esfuerzos. Aun así, el texto de su curso tuvo alguna influencia en los intentos de cuantizar la gravedad que se efectuaron a lo largo de los años. Dos de los estudiantes posdoctorales que asistieron al curso prepararon notas de él, que mecanografiadas se vendieron durante años en la librería de Caltech, hasta que finalmente aparecieron en forma de libro (Feynman 1995 b), más como una curiosidad histórica y por la personalidad de su autor que por su verdadero valor para la física.[145]

La historia, sin embargo, es difícil de prever, plena como está de cambios inesperados, de acontecimientos, algunos pequeños al principio, semillas de un futuro diferente. En 1962, cuando Feynman asistió, frustrado, al congreso de Polonia y comenzó su curso en Caltech, estaba abriéndose una nueva era, de oro para muchos, en la historia de la teoría de la relatividad general: la de los agujeros negros y la de las manifestaciones de la teoría en dominios experimentales. A semejante nueva era se ha referido en sus memorias el célebre físico Stephen Hawking (2014: 52-53):

Cuando empecé a investigar [1962], las dos áreas que parecían más atractivas eran la cosmología y la física de las partículas elementales. Esta constituía un

campo en continuo cambio que atraía a la mayoría de las mentes más privilegiadas, mientras que la cosmología y la relatividad general estaban estancadas en el mismo punto que en la década de 1930 [...] La cosmología y la gravitación eran campos desatendidos que en aquel momento estaban maduros para su desarrollo. A diferencia de las partículas elementales, existía una teoría bien definida —la teoría general de la relatividad—, pero se consideraba de una dificultad imposible. La gente disfrutaba de tal manera tratando de encontrar una solución a las ecuaciones de campo de Einstein que describen la teoría que no se planteaban qué significado tenía esa solución en la física, si es que tenía alguno. Era la vieja escuela de la relatividad general con la que Feynman se había topado en Varsovia. Resulta irónico pensar que aquel congreso de Varsovia también marcó el inicio del renacimiento de la relatividad general, aunque hay que disculpar a Feynman por no detectarlo en su momento.

Una generación nueva entró en la disciplina y aparecieron nuevos centros de estudio de la relatividad general.

UN VIEJO MUNDO NUEVO: SINGULARIDADES EN EL ESPACIO-TIEMPO RELATIVISTA

Aunque entonces no se denominaron «agujeros negros», los objetos astronómicos, a los que he aludido en la sección precedente, tenían ya una cierta historia cuando pasaron a ser protagonistas de una «revolución» dentro de la física relativista. Equivalentes newtonianos a ellos habían sido propuestos —y olvidados— mucho antes, primero, por el astrónomo británico John Michell en 1784 y, después, por Pierre Simon Laplace (1796).

La propuesta de Michell apareció en un artículo publicado en las Philosophical Transactions de la Royal Society de Londres y titulado «Una investigación sobre el paralaje probable y magnitud de las estrellas fijas, a partir de la cantidad de luz que nos suministran, y las circunstancias particulares de su situación». Los pasajes en los que introducía la idea de cuerpos de los que no podría escapar la luz son los siguientes (Michell 1784: 42, 50):

Si el semidiámetro de una esfera de la misma densidad que el Sol excediera la de este en la proporción de 500 a 1, un cuerpo que cayese hacia él desde una altura infinita adquiriría en su superficie una velocidad mayor que la de la luz y, por consiguiente, suponiendo que la luz es atraída por la misma fuerza en proporción a su vis inertiae [fuerza inercial] con otros cuerpos, toda la luz emitida por tal cuerpo se vería obligada a ir hacia sí por su propia gravedad [...] Si realmente existiesen en la naturaleza tales cuerpos, cuya densidad no es menor que la del Sol y cuyo diámetro es más de 500 veces el diámetro del Sol, como su luz no nos podría llegar [...] no podríamos disponer de información mediante la luz; sin embargo, si sucediera que otros cuerpos luminosos girasen en torno a un cuerpo de ese tipo, tal vez podríamos inferir su existencia con algún grado de probabilidad, gracias a las aparentes irregularidades de los cuerpos que se mueven en torno a él, irregularidades que no fuesen fácilmente explicables por otras hipótesis.

Al leer lo que escribía Michell hace más de dos siglos, no podemos sino

maravillarnos, no solo porque imaginó la posibilidad de lo que ahora llamamos «agujeros negros» sino, también, porque se dio cuenta de cómo identificarlos, de la misma forma que ahora se emplea.

En cuanto a Laplace, presentó la idea en su libro Exposition du système du monde (1796). Allí, en el capítulo sexto, al especular sobre el origen del sistema solar y la naturaleza del Universo, escribió Laplace (1796: 305): «La atracción gravitacional de una estrella con un diámetro 250 veces el del Sol y comparable en densidad a la Tierra, sería tan grande que la luz no podría escapar de su superficie. En consecuencia, los cuerpos más grandes del Universo podrían ser invisibles por razón de su magnitud». Laplace presentó esta posibilidad de forma meramente cualitativa, casi de pasada, sin ninguna prueba matemática. Suministró tal prueba cuando se lo pidió el astrónomo Franz Xaver von Zach; se publicó en la revista alemana Allgemeine Geographische Ephemeriden (Laplace, 1799).[146]

Como apunté antes, las ideas de Michell y Laplace no encontraron eco, algo que, por supuesto, no debe extrañarnos, tal era la novedad de la idea así como la imposibilidad de comprobarla. Como vimos, pudo haberse reavivado con los trabajos de Oppenheimer y sus colaboradores —especialmente a raíz del artículo con Snyder— en la década de 1939, pero también estos recibieron poca atención. La recuperación de la idea, y con ella la de los trabajos de Michell y Laplace, tuvo lugar a partir de la década de 1960, e inicialmente se plasmó en trabajos con un fuerte componente matemático, aunque estimulados en parte por el interés en los campos gravitacionales fuertes que propició el descubrimiento de los cuásares y los púlsares; y con dos protagonistas principales, los británicos Roger Penrose (n. 1931) y Stephen Hawking (n. 1942).

Pero antes de proseguir es casi obligatorio detenerse brevemente en el origen del «problema» de las singularidades en la teoría de la relatividad general.

Señalé en el capítulo primero que, en 1916, inmediatamente después de establecida la teoría de la relatividad general, Karl Schwarzschild encontró una solución exacta de las ecuaciones del campo gravitacional einsteiniano, en el vacío, producido por un cuerpo con simetría esférica. Expresada en coordenadas esféricas (las que determinan la posición de un punto mediante la distancia radial al centro, r, y los ángulos polar, θ, y azimutal, φ) la solución de Schwarzschild, que expresa la forma del espacio-tiempo y por consiguiente el «territorio» por el que transitan las partículas que se mueven en el campo gravitacional producido

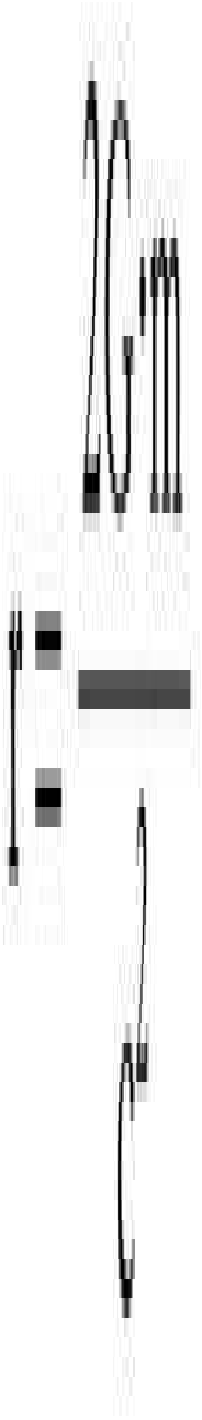
por la fuente, se escribe como:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 \left(d\theta^2 + \operatorname{sen}^2\theta \, d\phi^2\right) -$$

$$\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2$$

donde G es la constante de gravitación universal y m la masa de la fuente del campo gravitacional.

Sin entrar en más detalles, lo que es obvio en la anterior expresión es que habrá problemas en dos situaciones: una, para r = 0, ya que entonces en el último término, el $2G \cdot m/c^2 \cdot r$ se hará infinito; otra, si $(1 - 2G \cdot m/c^2 \cdot r)$ es igual a cero, que implica que el primer término de la derecha de la segunda parte de la igualdad se hará infinito ($A/0=\infty$, si $A \neq 0$). ¿Y cuándo se hace cero ds?. Evidentemente, en aquellos lugares en los que $1 = 2G \cdot m/c^2 \cdot r$, o lo que es lo mismo, cuando



A este r se le denomina «radio de Schwarzschild» (lo denotaré por RS), y a la «frontera» espacio-temporal que determina «horizonte». Y en la medida en que representa un lugar del espacio-tiempo, se puede decir que en él el espacio-tiempo se «rompe». Existen, no obstante, algunas escapatorias posibles a esta traumática situación. Como la métrica de Schwarzschild describe la geometría en el vacío, esto es, en el exterior del cuerpo que produce el campo gravitacional, si el radio de Schwarzschild está en el interior de ese objeto, la solución ya no es ahí válida y por consiguiente no existirá el problema. Pero si este no es el caso, sí que existirá un problema. Así, si tomamos un cuerpo de la masa de nuestro Sol, entonces RS es del orden de 3 kilómetros; es decir, dentro del radio del Sol y no habrá problema. Sin embargo, si existiesen objetos astronómicos de la masa del Sol pero con radio inferior a 3 km, sí que lo habría. No parece que existan semejantes objetos, pero sí que hay cuerpos con varias veces la masa del Sol (por ejemplo, estrellas de neutrones, que pueden tener masa del orden de 3 veces la del Sol y radios de alrededor de la docena de kilómetros). Veremos más adelante que los agujeros negros, objetos «encapsulados» dentro de un radio de Schwarzschild, existen realmente en el cosmos.

Pero aún hay algo más. El radio de Schwarzschild que he mostrado con relación a la solución de Schwarzschild, está expresado en un tipo concreto de coordenadas, las esféricas, pero uno de los principios sobre los que se edifica la relatividad general, el «principio de relatividad general», es el de que todos los sistemas de coordenadas deben representar la misma realidad física, lo que conduce a la pregunta de si no existirán otros sistemas de coordenadas en los que, al expresar la solución de Schwarzschild, desaparezca la singularidad RS. La respuesta es que sí existen, pero solo para el radio de Schwarzschild que, en consecuencia, deja de ser «singular», esto es, infinito, aunque no para la singularidad asociada a $r = 0$, ya que esta no se puede eliminar. Precisamente por semejante «incertidumbre» es importante introducir técnicas que permitan identificar las singularidades inevitables, independientemente de qué sistema de coordenadas se ha tomado para representar la situación física considerada. Como veremos enseguida, tales técnicas fueron desarrolladas sobre todo por Roger Penrose.

Antes que el «estilo Penrose» se impusiese, un grupo de físicos soviéticos —miembros de la escuela de Landau— Evgeny Lifshitz, V. V. Sudakov e Isaak M.

Khalatnikov (Lifshitz y Khalatnikov 1960 a, b; Lifshitz, Sudakov y Khalatnikov 1961), comenzaron a estudiar, a comienzos de la década de 1960, las singularidades del espacio-tiempo relativista, basándose en el «enfoque de coordenadas». La conclusión a la que llegaron fue que «la presencia de una singularidad temporal no es una propiedad esencial del modelo cosmológico de la teoría general de la relatividad, y el caso general de una distribución arbitraria de materia y campo gravitacional no conduce a la aparición de una singularidad» (Lifshitz, Sudakov y Khalatnikov 1961: 1301).

Los artículos de las revistas científicas tienen una audiencia limitada, la de los profesionales del campo correspondiente, un público aún más limitado en este caso si tenemos en cuenta que, aunque escritos en inglés, la revista se publicaba en la Unión Soviética. Sin embargo, estos límites a la difusión se vieron más que compensados, porque los trabajos se incluyeron algo después en uno de los volúmenes del célebre Curso de Física Teórica de Landau y Lifshitz, al que ya he hecho referencia en otra sección, y que, además de en el ruso original, vio ediciones en inglés, francés y español. El volumen, uno de los más utilizados por los estudiantes de la carrera de Físicas, estaba dedicado a la Teoría clásica de campos. Cito a continuación lo que aparece sobre las singularidades cosmológicas en la edición en español (Landau y Lifshitz 1966: 453-454), en una sección, casi al final el libro, titulada «La ausencia de singularidades en la solución cosmológica general»:

La hipótesis de la homogeneidad e isotropía completa de la distribución de la materia en el espacio, que constituye la base de los modelos cosmológicos que acabamos de estudiar, es una hipótesis de considerable alcance desde el punto de vista matemático, aparte del hecho de que en el mundo real puede ser, en el mejor de los casos, tan solo aproximadamente correcta. Se plantea en relación con esto la cuestión de hasta qué punto es precisamente esta hipótesis la causa de la importante característica del modelo isótropo: la existencia de una singularidad temporal [...] Las únicas singularidades físicas son aquellas que resultan peculiares del propio espacio-tiempo, que no están ligadas al carácter del sistema de referencia. Pero la singularidad que, conforme hemos demostrado, debe presentarse de manera inevitable en el sistema síncrono puede ser ficticia y desaparecer cuando pasamos a otro sistema de referencia. La posibilidad de que ocurra así se manifiesta ya en el hecho de que la demostración que hemos dado conserva su validez para una métrica no galileana en un espacio-tiempo plano,

para el que es obvio, desde un buen principio, que la singularidad es ficticia.

Simples consideraciones geométricas prueban que esta singularidad, inevitable en el sistema de referencia síncrono, es de hecho ficticia en general.

Que estaban equivocados es algo que probaron Penrose y Hawking con una serie de teoremas que demostraron en 1965 y 1966 (Penrose 1965; Hawking 1965, 1966 a, 1966 b), Penrose y Hawking 1969).[147] En sus memorias, Hawking (2014: 75-77) explicaba qué es lo que hicieron los físicos soviéticos y cuál fue su respuesta:

Dos rusos, Lifshitz y Khalatnikov, decían haber demostrado que una contracción general [la que podía llevar a una singularidad; JMSR] conduciría siempre a un rebote, donde la densidad se mantendría finita [así se evitaba la singularidad; JMSR]. Aquel resultado era muy adecuado para el materialismo dialéctico marxista-leninista porque evitaba preguntas incómodas sobre la creación del Universo, de modo que se convirtió en un artículo de referencia para los científicos soviéticos.

Lifshitz y Khalatnikov formaban parte de la vieja escuela de la relatividad general, es decir, escribían un sistema enorme de ecuaciones e intentaban llegar a una solución. Sin embargo, no estaba claro que la solución que habían encontrado fuera la más general. Roger Penrose presentó un nuevo enfoque en el que no era necesario resolver explícitamente las ecuaciones del campo de Einstein sino solo determinadas propiedades generales, como que la energía es positiva y la gravedad es atractiva. Penrose dio un seminario sobre el tema en el King’s College de Londres en enero de 1965. No estuve en el seminario, pero me habló de él Brandon Carter, con quien compartía despacho en las nuevas instalaciones en Cambridge del Departamento de Matemáticas Aplicadas y Física Teórica, en Silver Street.

Al principio no entendía qué sentido tenía. Penrose había demostrado que cuando una estrella que muere se contraía hasta alcanzar un determinado radio, inevitablemente se producía una singularidad, un momento en el que el espacio y el tiempo llegaban a su fin. Por supuesto, pensaba yo, ya sabíamos que nada podía impedir que una estrella fría enorme se desmoronara bajo su propia

gravedad hasta llegar a una singularidad de densidad infinita. Pero de hecho las ecuaciones se habían resuelto solo para el colapso de una estrella «perfectamente esférica», y por supuesto una estrella real no será exactamente esférica. Si Lifshitz y Khalatnikov estaban en lo cierto, las desviaciones de la simetría esférica aumentarían a medida que la estrella colapsara, y haría que las diferentes partes de la estrella no se encontraran, de modo que impedirían una singularidad de densidad infinita. Sin embargo, Penrose demostró que estaban equivocados: las pequeñas desviaciones de la simetría esférica no impedirían una singularidad.

Me di cuenta de que se podrían aplicar argumentos parecidos a la expansión del Universo y demostrar que existían singularidades en las que el espacio-tiempo tenía un principio. Una vez más, Lifshitz y Khalatnikov estaban equivocados. La relatividad general predecía que el Universo debería tener un principio, un resultado que no pasó desapercibido para la Iglesia.

Un aspecto esencial de los trabajos de Penrose y Hawking, y que marcaría una nueva dirección en la investigación en las singularidades del espacio-tiempo gravitacional relativista, fue la introducción de técnicas matemáticas diferentes a las empleadas hasta entonces, a las que Hawking aludía en la cita anterior a la vez que adjudicaba a Roger Penrose este nuevo enfoque. Fue, efectivamente, Penrose quien inició esa «revolución», aparentemente, solo aparentemente, silenciosa o desapercibida para muchos.

Que fuese Penrose quien pusiera en marcha esa «revolución», secundado en seguida por Hawking, es consistente con su biografía, ya que antes de dedicarse a la física matemática —en el ámbito de la relatividad general, sobre todo— fue un matemático puro.[148] Se graduó en matemáticas en el University College de Londres, tras lo cual se dedicó a la investigación en matemática pura en la Universidad de Cambridge bajo la supervisión, primero, de William Hodge, y luego de John Todd. La rama en la que se especializó, la geometría algebraica, influiría poderosamente en los enfoques que adoptó cuando centró su investigación en la teoría de la relatividad general. Una vez obtenido su doctorado (PhD), en 1957, consiguió un puesto de research fellow por tres años en el St. John’s College de Cambridge (por cierto, el college de Dirac). Fue entonces, influido poderosamente por Dennis Sciama, cuando además de seguir investigando en matemática pura, comenzó a publicar artículos sobre cosmología.[149] Entre 1959 y 1961, becado por la OTAN, estuvo en Estados

Unidos, en las Universidades de Princeton y de Siracusa, donde existían importantes grupos dedicados a la relatividad general (John Wheeler en Princeton, Peter Bergmann en Siracusa). Cuando regresó a Inglaterra, lo hizo a un centro con una mayor presencia en relatividad general que en los estadounidenses: el King's College de Londres, donde trabajaba Hermann Bondi, catedrático allí, y otros notables relativistas como Felix Pirani (Bondi influyó mucho en el interés que desarrolló Penrose por la relatividad general). Finalmente, convertido ya en uno de los líderes mundiales en el campo relativista y tras pasar dos años en otro importante enclave relativista, la Universidad de Texas, en Austin, en 1964 entró en el Birkbeck College de Londres (como catedrático desde 1966), lugar que abandonó en 1973 para convertirse en Rouse Ball Professor de Matemáticas en la Universidad de Oxford, donde permaneció hasta su jubilación en 1998.

Para dar una idea, aunque superficial, de las motivaciones que guiaron a Penrose en la elaboración de un nuevo marco geométrico-matemático para el estudio de la estructura y dinámica del espacio-tiempo relativista, tomaré una cita del trabajo An Analysis of the Structure of Space-Time, que Penrose presentó al Premio Adams, que fue convocado por la Universidad de Cambridge para el bienio 1965-1966 (el premio lo compartió con el que compuso Hawking, Singularities and the Geometry of Space-Time). Cito del «Resumen» que encabezaba el ensayo de Penrose (Penrose 1966: i):[150]

Este ensayo se ocupa de técnicas para analizar la estructura del espacio-tiempo y de ciertas aplicaciones. En una primera instancia, la motivación para introducir las técnicas particulares que aquí se introducen emana de la creencia de que, acaso finalmente, la imagen de la variedad diferenciable del espacio-tiempo pueda tener que ser abandonada; o, al menos, que el cono nulo [también conocido como «cono de luz»; se refiere al lugar geométrico, en forma de cono, constituido por el conjunto de puntos a los que puede llegar una señal de luz emitida desde el vértice del cono] y la estructura «causal» del espacio-tiempo deberían considerarse, de alguna manera, como esencialmente más fundamentales que su estructura diferenciable-continua. La idea es reformular la teoría de la relatividad de manera que el énfasis se desplace de los sistemas de coordenadas y los métodos de la geometría diferencial general a ciertos conceptos que están unidos a la existencia de los conos de luz, e incluso a la particular dimensionalidad y signatura de nuestro espacio-tiempo. En

consecuencia, el método que surge está más ajustado a la física relativista que aquellas técnicas que actualmente pueden ser consideradas «convencionales».

El enfoque de Penrose se basaba en considerar la estructura del espacio-tiempo en términos de relaciones de «antes-después», siendo el nexo de unión entre dos puntos la señal de la luz.[151] De hecho, tal enfoque había sido introducido bastante tiempo atrás y repetidas veces —y olvidado por casi todos— en una serie de libros por Alfred Arthur Robb (1911, 1914, 1921, 1936), un peculiar irlandés que pasó la mayor parte de su vida en la Universidad de Cambridge, donde se había graduado.[152] Para comprender que así fue (aunque, por supuesto, Penrose añadió mucho a las ideas de Robb), basta con leer lo que escribió en el «Prefacio» de uno de sus libros, The Absolute Relations of Time and Space (Robb 1921: vii):

He tenido éxito en desarrollar una teoría del Espacio y el Tiempo en términos de las relaciones de antes y después, pero en la que estas relaciones se consideran absolutas y no dependientes del observador particular.

De hecho, no es en absoluto una «teoría de la relatividad» en el sentido de Einstein, aunque ciertamente incluye relaciones.

Estas relaciones de antes y después, sirviendo, como sirven, de base física para una teoría matemática, fueron bastante ignoradas en el tratamiento de Einstein, con el resultado de que los rasgos absolutos se perdieron de vista.

Incluso ahora, seis años después de la publicación de mi libro [Robb 1914], comparativamente pocos de los seguidores de Einstein parecen haberse dado cuenta de la extrema importancia de estas relaciones, o han reconocido cómo alteran todo el aspecto del tema [...]

Por lo que ahora puedo juzgar, la situación es esta: una vez que se introducen las coordenadas en la teoría que se desarrolla aquí da lugar al mismo análisis que en la denominada «relatividad restringida» de Einstein, y esta no se puede considerar satisfactoria al margen de mi trabajo, o de alguno equivalente.

Más de noventa años después de que fuesen escritas las anteriores líneas, sorprende la visión y profundidad que albergan. No creo que haya nada en ellas que Penrose y todos los que con él o después de él se ocuparon del tema —científicos como Robert Geroch, George Ellis, Werner Israel, Brandon Carter, además de Hawking— no pudiesen subscribir.

Del 13 al 17 de julio de 1970, Penrose desarrolló un breve pero intenso curso en la Universidad de Pittsburgh dedicado a las «Técnicas de topología diferencial en relatividad», en el que presentó los aspectos básicos del nuevo enfoque. Las primeras líneas del «Prefacio» del librito (72 páginas) que surgió de aquel curso (está compuesto con las notas tomadas por uno de los asistentes, revisadas, por supuesto, por Penrose) hacen hincapié en un aspecto que se debe resaltar, la interacción «matemática-física» (Penrose 1972: vii):

El propósito de estas notas es doble. En primer lugar, familiarizar al especialista en la teoría de la relatividad con algunas técnicas globales modernas para el tratamiento del espacio-tiempo. Espero que el detalle dado aquí será suficiente para permitirle utilizar estas técnicas cuando las necesite y acaso incorporarlas en su forma de pensar. En segundo lugar, intento que las notas puedan proporcionar al matemático puro, que tiene algún conocimiento de geometría diferencial, un camino al tema de la relatividad general, de manera que sea capaz, directamente y sin poseer conocimientos físicos detallados, de emplear sus recursos matemáticos e ideas especiales en un campo que tiene un profundo interés para la física.

Este texto de Penrose pronto se vio superado por un libro que Hawking escribió junto a un sudafricano, el físico-matemático George F. R. Ellis, quien después de graduarse en la Universidad de Cape Town se trasladó a Cambridge, donde obtuvo su doctorado y entró a formar parte del grupo, liderado por Dennis Sciama, del que formaba parte Hawking. Se trata de The Large Scale Structure of Space-Time (Hawking y Ellis 1973), un texto exigente desde el punto de vista matemático.[153]

INTERLUDIO: MATEMÁTICAS Y FÍSICA

Matemáticas y física, en efecto, se relacionan de una manera particularmente intensa en el dominio de la teoría de la relatividad general. De hecho, esto sucedió desde sus inicios; ya mencioné en el capítulo primero que la teoría einsteiniana necesitó de la geometría no euclidea desarrollada por Lobachevskii, Bolyai y Riemann. Particularmente importante para que Einstein pudiese desarrollar su teoría fue un artículo que los matemáticos italianos Gregorio Ricci y Tullio Levi-Civita (1901) publicaron en 1901, que contiene la mayor parte de los elementos de la geometría riemanniana necesarios para la relatividad general. A su vez, y como ya señalé con relación a las teorías del campo unificado, la relatividad general estimuló el desarrollo de nuevas perspectivas geométricas.

En el caso de la física cuántica, ya vimos que, aunque Heisenberg no se diese cuenta de ello inicialmente, las estructuras que manejaba en 1925 eran matrices. El que no se diese cuenta se debió a que la consideración de estos objetos matemáticos no formaba parte del programa de estudios de física, y eso pese a que el término «matriz» había sido introducido por James Joseph Sylvester (1850) para denotar una disposición regular, en filas y columnas, de números, y que pocos años después Arthur Cayley (1858) desarrollase el álgebra matricial, independientemente de que las matrices representasen —como se suponía hasta entonces— o no, formas lineales o bilineales asociadas a transformaciones. Afortunadamente, Max Born, antiguo ayudante de Hilbert, sí había estudiado ese tema y, junto a Pascual Jordan, ayudó a Heisenberg a producir una formulación más exacta de la mecánica cuántica.

Con respecto a la presentación de Schrödinger, la matemática en que se basaba había sido tratada en el libro Methoden der mathematischen Physik, de Richard Courant y David Hilbert (1924). Este incluía, en particular, una teoría de las ecuaciones integrales lineales, que relacionaba con ecuaciones diferenciales sometidas a condiciones de contorno, así como con ecuaciones de autovalores, lo que es tanto como decir la matemática de operadores y sus espectros; recuérdese en este sentido que los artículos en los que Schrödinger presentó su mecánica cuántica, se titulaban «Cuantización como un problema de autovalores».

De Dirac, ya mencioné la relación que mantuvo con las matemáticas, en

concreto con los corchetes de Poisson, pero aún no he aludido a lo que se conoce como «función de Dirac», representada por $\delta(x)$, cuyo valor es cero, excepto en el punto $x= 0$ en donde vale infinito, y cuya integral sobre todo el rango de los números reales es igual a 1. Este ente matemático fue, y continúa siendo, muy útil para la teoría cuántica, pero a pesar de su denominación, «función», no responde a los requisitos que deben cumplir tales objetos matemáticos; sin embargo, dio origen a un nuevo campo en el dominio de la matemática, el de las «distribuciones», en el que sobresalió el francés Laurent Schwartz (1945, 1950-1951). Nótese que, mientras que en el caso de los corchetes de Poisson el apoyo provino de las matemáticas, en el caso de las distribuciones fue al contrario.

También me ocupé en el primer capítulo de la formalización matemática que John von Neumann hizo de la mecánica cuántica en su libro de 1932, Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, que de hecho fue precedido por un trabajo del propio Von Neumann (1927) en el que estableció en base matemática segura las estructuras de un número infinito de dimensiones —«espacios de Hilbert» las denominó— que había introducido inicialmente Hilbert. A partir de entonces, los espacios de Hilbert no solo se convirtieron en un elemento imprescindible de cualquier presentación de la mecánica cuántica, sino también protagonista principal de ramas de la matemática como los espacios funcionales o la teoría de operadores.

Otra rama de la matemática que recibió un fuerte impulso de la mecánica cuántica fue la teoría de grupos. Uno de los matemáticos que trabajó en la teoría de los grupos de Lie fue Hermann Weyl. Como tuvimos oportunidad de comprobar con relación a la relatividad general, aunque matemático, Weyl mostró a lo largo de toda su carrera interés por la física, especialmente por aquellas ramas de esta con una fuerte dimensión matemática. Una vez que se dispuso de la mecánica cuántica, Weyl (1928, 1932), que llevaba tiempo trabajando en aspectos matemáticos de los grupos de Lie, reconoció que la teoría de grupos constituía un instrumento particularmente adecuado para la física cuántica y en 1928 publicó un libro, Gruppentheorie und Quantenmechanik (Teoría de grupos y mecánica cuántica; Weyl 1928), cuya segunda edición (de 1931) fue traducida al inglés y publicada en 1932 (The Theory of Groups and Quantum Mechanics; Weyl 1932), ampliando de esta manera considerablemente el rango de sus lectores.

No obstante, el texto de Weyl era demasiado complejo. «Weyl no escribía con claridad y la mayor parte de los físicos no comprendió su libro», manifestó en su

autobiografía Eugene Wigner (1992: 118), un físico húngaro que estudió en Alemania y que a partir de 1929 se instaló en Estados Unidos (ya apareció en el capítulo 1). Fue precisamente Wigner quien más hizo por introducir la teoría de grupos en la física cuántica (en cristalografía ya llevaba bastante tiempo siendo aplicada, aunque allí los grupos eran más sencillos, no continuos). A partir de 1926, Wigner comenzó a publicar una serie de artículos sobre la mecánica cuántica en los que la teoría de grupos estaba presente, y en 1931 publicó un libro titulado Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren (Teoría de grupos y sus aplicaciones a la mecánica cuántica de los espectros atómicos; Wigner 1931). Aunque a diferencia del texto de Weyl, este libro no sería vertido al inglés hasta 1959 (Wigner 1959), sin embargo fue enormemente influyente. Lo que no quiere decir que todos los físicos aceptaran inmediatamente la necesidad de recurrir a la teoría de grupos. Incluso uno de los más jóvenes protagonistas de la revolución que produjo la mecánica cuántica, el siempre mordaz Wolfgang Pauli, introdujo la expresión «die gruppenpest», con la que quería decir «la peste de los grupos», o, tal vez mejor, «el apestoso asunto de los grupos». Además de Pauli (que no tardaría en convertirse él mismo en miembro destacado de ese «apestoso grupo»), otros a los que desagradaba este formalismo matemático eran Max von Laue, Erwin Schrödinger y Max Born. Pero semejante oposición no tardó en diluirse, sobre todo al comprobarse la eficacia de la teoría de grupos en la física cuántica, y luego, y de manera aún más intensa, en una rama de esta, la física teórica de altas energías. Pero de esa física, todavía es pronto para hablar. Ahora volvamos a los agujeros negros.

LOS AGUJEROS NEGROS: DINÁMICA Y REALIDAD FÍSICA

Dos años después de que Penrose y Hawking publicasen sus primeros artículos, la física de las singularidades del espacio-tiempo se convirtió en la de los «agujeros negros», un término afortunado que no ha hecho sino atraer la atención popular sobre este ente físico. El responsable de esta aparentemente insignificante pequeña revolución terminológica fue John Wheeler. Él mismo explicó la génesis del término de la forma siguiente (Wheeler y Ford 1998, 296-297):

En el otoño de 1967, Vittorio Canuto, director administrativo del Instituto Goddard para Estudios Espaciales de la NASA en el 2880 de Broadway, en Nueva York, me invitó a dar una conferencia para considerar posibles interpretaciones de las nuevas y sugerentes evidencias que llegaban de Inglaterra acerca de los púlsares. ¿Qué eran estos púlsares? ¿Enanas blancas que vibraban? ¿Estrellas de neutrones en rotación? ¿Qué? En mi charla argumenté que debíamos considerar la posibilidad de que en el centro de un púlsar se encontrase un objeto completamente colapsado gravitacionalmente. Señalé que no podíamos seguir diciendo, una y otra vez, «objeto completamente colapsado gravitacionalmente». Se necesitaba una frase descriptiva más corta. ¿Qué tal agujero negro?, preguntó alguien de la audiencia. Yo había estado buscando el término adecuado durante meses, rumiándolo en la cama, en la bañera, en mi coche, siempre que tenía un momento libre. De repente, este nombre me pareció totalmente correcto. Cuando, pocas semanas después, el 29 de diciembre de 1967, pronuncié la más formal conferencia Sigma Xi-Phi Kappa en la West Ballroom del Hilton de Nueva York, utilicé este término, y después lo incluí en la versión escrita de la conferencia, publicada en la primavera de 1968.

El nombre era sugerente y ha permanecido, con tanto éxito como para haber traspasado los límites de la física siendo aplicado a dominios tan diferentes como la economía o la política, pero la explicación que daba Wheeler era errónea (un púlsar está propulsado por una estrella de neutrones).

Por supuesto, las investigaciones sobre singularidades en espacio-tiempos continuaron introduciendo importantes matices nuevos, pero esa historia me llevaría demasiado lejos y debo prescindir de ella y centrarme en aspectos más «físicos» de la física de los agujeros negros. Pero antes, quiero destacar dos puntos de cierta importancia, y para ello recurriré a un artículo que Penrose publicó en 1969 en la Rivista del Nuovo Cimento. El primer punto se refiere a que las singularidades no aparecen en todos los modelos posibles de Universo (Penrose 1969: 263):[154] «[Los teoremas relativos a las singularidades] muestran que la presencia de singularidades en el espacio-tiempo en modelos exactos no es solamente una característica de un alto grado de simetría, sino que pueden esperarse también en modelos [...] perturbados. Esto no quiere decir que todos los espacio-tiempos curvados de la relatividad general sean singulares, ni mucho menos. Existen modelos exactos conocidos que son completos y que están libres de singularidades». El segundo punto tiene que ver con otras posibles teorías del espacio-tiempo gravitacional (Penrose 1969: 261): «Admito la posibilidad de que las ecuaciones de campo de Einstein puedan ser incorrectas, pero no que el marco general de una geometría pseudo-riemanniana pueda ser incorrecto [...] Es interesante tener en cuenta que la discusión matemática genérica que se utiliza en la actualidad, en lo referente al colapso, toma pocos detalles concretos de las ecuaciones de Einstein, todo lo que se necesita es cierta desigualdad relacionada con el carácter definido positivo de la energía. De hecho, si se adoptara la teoría de Brans-Dicke en lugar de la de Einstein, no se añadiría virtualmente ninguna diferencia cualitativa a la discusión del colapso».[155]

Establecidos los puntos anteriores, pasemos a considerar un desarrollo particularmente importante sobre los agujeros negros.

La idea física subyacente en los agujeros negros era que debían representar objetos muy diferentes a cualquier otro tipo de estrella, aunque su origen estuviese ligado a estas. Surgirían cuando, después de agotar su combustible nuclear, una estrella muy masiva comenzase a contraerse irreversiblemente debido a la fuerza gravitacional. Así, llegaría un momento en el que se formaría una región, el mencionado «horizonte», que únicamente dejaría entrar materia y radiación, sin permitir que saliese nada, ni siquiera luz (de ahí lo de «negro»): cuanto más grande es el área del horizonte de sucesos, más «come», más materia y radiación atrapa, y cuanto más lo hace, más crece. En el centro del agujero negro está el punto de colapso. De acuerdo con la relatividad general, allí la materia que una vez compuso la estrella es comprimida y expulsada

aparentemente «fuera de la existencia».

Evidentemente, «fuera de la existencia» no era, no es, una idea aceptable. Ahora bien, existía una vía de escape obvia a semejante paradójica solución: la teoría de la relatividad general no es compatible con los requisitos cuánticos, pero cuando la materia se comprime en una zona muy reducida son los efectos cuánticos los que dominarán. Por consiguiente, para comprender realmente la física de los agujeros negros es necesario disponer de una teoría cuántica de la gravitación (cuantizar la relatividad general o construir una nueva teoría de la interacción gravitacional que sí se pueda cuantizar), una tarea aún pendiente en la actualidad, aunque se hayan dado algunos pasos en esta dirección, uno de ellos debido al propio Hawking: la denominada «radiación de Hawking» (Hawking 1975 a, b), la predicción de que, debido a procesos de índole cuántica, los agujeros negros no son tan negros como se pensaba, pudiendo emitir radiación.

Fue durante un simposio celebrado en Oxford en 1974 cuando Hawking sorprendió al mundo de los relativistas con esta propuesta, la de que los agujeros negros, a los que hasta entonces se había considerado incapaces de emitir nada, solo de absorber, radiaban debido a un mecanismo mecánico-cuántico, en el que se producían pares partícula-antipartícula. En definitiva, lo que hizo Hawking fue utilizar una teoría semiclásica de la gravitación, en la que relatividad general y teoría cuántica se combinaban. El efecto final es que los agujeros negros crean y emiten partículas (emisión térmica) como si fueran objetos calientes con una cierta temperatura, definida en términos de lo que vino en denominar «termodinámica de los agujeros negros», un apartado en cuya creación también intervino un estudiante de doctorado de John Wheeler en Princeton: Jacob Bekenstein (1972, 1973, 1974).

Nacido en la ciudad de México en 1947, en el seno de una familia de origen judío que había emigrado de Polonia, Bekenstein se graduó (1969) en Física en la Polytechnic University de Brooklyn, Nueva York, en la que la familia Bekenstein terminó instalándose en 1964. Basándose en la teoría de la información, entendida sobre todo a la manera de los trabajos que sobre ella había producido el físico francés Léon Brillouin (1956), dio en su tesis, leída en 1973, un paso decisivo: relacionar la superficie de un agujero negro —que siempre crece al atrapar constantemente materia-energía; no dejar escapar nada de él— con la entropía, que siempre aumenta. Expresado en sus propias palabras (Bekenstein 1973: 2339):[156]

Supongamos que un cuerpo que contiene una cierta cantidad de entropía cae en un agujero negro. La entropía del Universo visible disminuye en el proceso [ya que también lo hace la información, puesto que no es posible saber lo que sucede en el interior de un agujero negro; JMSR]. Parecería que la segunda ley de la termodinámica [la que afirma que la entropía de un sistema cerrado —y el Universo lo es— siempre aumenta; JMSR] es transcendida aquí en el sentido de que un observador externo nunca puede verificar mediante una medida directa que la entropía total de todo el Universo no disminuye en el proceso. Sin embargo, sabemos que el área del agujero negro «compensa» la desaparición del cuerpo al aumentar irreversiblemente. Es natural por tanto suponer que la segunda ley no se transciende realmente siempre que se exprese de una forma generalizada: La entropía en el exterior de un agujero negro más la entropía del agujero negro nunca disminuye. Esta afirmación significa que debemos considerar la entropía de un agujero negro como una contribución genuina al contenido de entropía del Universo.

Sin embargo, la reacción inicial de Hawking a este trabajo no fue la de estar de acuerdo. Veamos lo que escribió en este sentido, años después, en su famoso libro, A Brief History of Time (Hawking 1988: 142):

[La propuesta de Bekenstein] parecía evitar el que la segunda ley de la termodinámica fuera violada en la mayoría de las situaciones. Sin embargo, había un error fatal. Si un agujero negro tuviera entropía, entonces también tendría que tener una temperatura. Pero un cuerpo a una temperatura particular debe emitir radiación a un cierto ritmo. Es una cuestión de experiencia común que si se calienta un atizador en el fuego se pone rojo incandescente y emite radiación; los cuerpos a temperaturas más bajas también emiten radiación, aunque normalmente no se aprecia porque la cantidad es bastante pequeña. Se requiere esta radiación para evitar que se viole la segunda ley. Así pues, los agujeros negros deberían emitir radiación. Pero por su propia definición, los agujeros negros son objetos que se supone no emiten nada. Parece, por tanto, que el área de un agujero negro no podía asociarse con su entropía.

Así que, en 1973, James Bardeen, Brandon Carter y Hawking (1973) publicaron un artículo en el que señalaban, según ellos, este «error fatal» de Bekenstein. Se equivocaban, como reconocería el propio Hawking en el simposio de Oxford de 1974: los agujeros negros radian. Pero hasta que se dio cuenta, Hawking se mostró en diversas ocasiones irritado con Bekenstein: «Debo admitir», confesaba en A Brief History of Time (Hawking 1988: 142-143), «que al escribir este artículo [con Bardeen y Carter] estaba motivado, en parte, por mi irritación contra Bekenstein, quien, según yo creía, había abusado de mi descubrimiento del aumento del área del horizonte de sucesos. Pero al final resultó que él estaba básicamente en lo cierto, aunque de una manera que él no podía haber esperado».[157] El «descubrimiento de Hawking del aumento de área del horizonte de sucesos» tuvo lugar, parece, entre 1970 y 1971 y, por lo que yo sé, lo hizo explícito en un artículo que apareció en 1972 en la revista Communications in Mathematical Physics, titulado «Agujeros negros en relatividad general»; en él, en la sección 2, y empleando un ropaje matemáticamente muy exigente, definía un agujero negro en términos del horizonte de sucesos, demostrando que «el área de la superficie de un agujero negro no puede disminuir con el tiempo» (Hawking 1972:).

La emisión de radiación por un agujero negro conduciría a una lenta disminución de su masa. Si la disminución fuese continua, el agujero negro podría terminar desapareciendo. Sin embargo, para agujeros negros normales (de unas pocas masas solares), esto no sucedería. En el caso, por ejemplo, de un agujero negro de una masa solar, su temperatura sería menor que la de la radiación del fondo de microondas, lo que significa que agujeros negros de semejante masa absorberían radiación más rápidamente de lo que la emitirían; esto es, continuarían aumentando de masa. Pero, si existiesen agujeros negros muy pequeños (formados, por ejemplo, en los primeros instantes del Universo, debido a las fluctuaciones de densidad que se debieron producir entonces), estos tendrían una temperatura mucho mayor y radiarían más energía de la que absorberían. Perderían masa, lo que les haría todavía más calientes, estallando finalmente en una gran explosión de energía. Su vida sería tal, que quizá podríamos observar tales explosiones ahora. No obstante, aún no han sido detectadas.

Lo que sí se han observado son los agujeros negros «normales». El procedimiento para detectarlos, aunque por definición no son visibles, estriba en que sus efectos gravitacionales sí lo son (como había imaginado John Michell). Si, por ejemplo, un sistema binario (abundante en el Universo) está formado por una estrella y un agujero negro, se puede identificar a este a través del

movimiento de la estrella o detectar intensas fuentes de rayos X producidas al caer materia interestelar, o de la estrella compañera, al agujero negro. En 1966, Yakov Zeldovich, un ilustre representante de la escuela de física soviética, y Oktay Guseynov propusieron que la observación de rayos X o rayos γ en sistemas binarios podía constituir la marca de la existencia de una estrella de neutrones o de un agujero negro (Zeldovich y Guseynov 1966), una propuesta que investigaron, tres años después, Virginia Trimble y Kip Thorne (1969), pero sin resultados positivos: no se encontró ningún sistema binario que coincidiese con fuentes conocidas de rayos X.[158] La primera evidencia obtenida fue consecuencia de la puesta en órbita, el 12 de diciembre de 1970, desde Kenia, para conmemorar la independencia del país, de un satélite estadounidense bautizado como Uhuru, la palabra suajili para «Libertad». Con este instrumento se pudo determinar la posición de las fuentes de rayos X más poderosas. Entre las 339 fuentes identificadas figuraba Cygnus X-1, una de las más brillantes de la Vía Láctea, en la región del Cisne. Astrónomos del Observatorio Radioastronómico Nacional estadounidense y del Observatorio Westerbork holandés asociaron posteriormente esta fuente de rayos X (Braes y Miley 1971; Hjellming y Wade 1971; Bolton 1972; Webster y Murdin 1972) a una estrella supergigante azul visible, de una masa 30 veces la del Sol y una compañera invisible cuya masa se estimó —analizando el movimiento de su compañera— en 7 masas solares, una magnitud demasiado grande para ser una enana blanca o una estrella de neutrones, por lo que se considera un agujero negro. Ya se han encontrado otros sistemas binarios, uno de cuyos miembros parece ser un agujero negro: por ejemplo, V404 Cygni, constituido por una estrella de 2/3 la masa del Sol y un agujero negro de 12 masas solares.

Y no solo es esto: se han identificado agujeros negros supermasivos en núcleos de galaxias, en, por ejemplo, la galaxia, cercana a la Vía Láctea, NGC 4258, que se estima contiene un agujero negro de alrededor de $2{,}7 \cdot 10^7$ masas solares. Parece que abundan en el Universo este tipo de agujeros negros: hay uno, incluso, en nuestra galaxia, la Vía Láctea, de masa $2{,}6 \cdot 10^6$ masas solares.

Recuerdo que cuando comencé, a comienzos de la década de 1970, mis estudios doctorales en el campo precisamente de la relatividad, mi supervisor, Luis Bel, un distinguido experto en relatividad, pensaba que los agujeros negros no eran sino «fantasmas» matemáticos que aparecían en las ecuaciones de la teoría de la relatividad general. No mucho después, se comenzó a descubrir que estos extraños objetos astrofísicos abundan en el Universo. Además, y por distintas razones, no la menor el atractivo que posee la personalidad de Stephen Hawking,

sometido a muy severas limitaciones físicas (padece esclerosis lateral amiotrófica, lo que no le ha impedido continuar no solo trabajando y ocupando puestos académicos distinguidos (ocupó la cátedra Lucasiana de la Universidad de Cambridge —la misma que desempeñaron, entre otros, Isaac Newton y Paul Dirac— entre 1979 y 2009), sino mostrar un admirable espíritu, alegre y abierto a los no científicos, como mostró su ya citado éxito de ventas mundial: A Brief History of Time), los agujeros negros se han convertido en un tema de interés popular.

Sin embargo, no podemos olvidar que no sabemos realmente qué son los agujeros negros —¿a dónde va, qué pasa con la materia que engullen?—, aunque existir, existen. Habrá que esperar a que exista una teoría cuántica de la gravedad para responder a esas preguntas.

RADIACIÓN GRAVITACIONAL Y LENTES GRAVITACIONALES

Cuando mencioné con anterioridad, en este mismo capítulo, la radiación gravitacional, una de las predicciones de la relatividad general, dije entonces que la comprobación de su existencia constituía un problema experimental muy complicado. Pues bien, gracias a los púlsares ha sido posible demostrar que existe. La confirmación de que, efectivamente, la radiación gravitacional existe derivó del descubrimiento, en 1974, del primer sistema formado por dos púlsares interaccionando entre sí (denominado PSR1913+16), descubrimiento por el que Russell Hulse y Joseph Taylor (1975) recibieron en 1993 el Premio Nobel de Física. En 1978, después de varios años de observaciones continuadas de ese sistema binario, pudo concluirse que las órbitas de los púlsares varían acercándose entre sí, un resultado que se interpreta en términos de que el sistema pierde energía debido a la emisión de ondas gravitacionales (Taylor, Fowler y McCulloch 1979). Desde entonces han sido descubiertos otros púlsares en sistemas binarios, pero aún está pendiente de detectar la radiación gravitacional, identificando su paso por instrumentos construidos e instalados en la Tierra, una empresa extremadamente difícil dado lo minúsculo de los efectos implicados: se espera que las ondas gravitacionales que lleguen a la Tierra (originadas en algún rincón del Universo en el que tenga lugar un suceso extremadamente violento) produzcan distorsiones en los detectores de no más de una parte en 10^{21}; esto es, una pequeña fracción del tamaño de un átomo. Existen ya operativos diseñados para lograrlo: el sistema de 4 kilómetros de detectores estadounidenses denominado LIGO, por sus siglas inglesas, Laser Interferometric Gravitational wave Observatories, establecido en 1992 por Kip Thorne y Ronald Drever del California Institute of Technology y Rainer Weiss del MIT.

También los cuásares resultan ser objetos muy útiles para estudiar el Universo en conjunción con la relatividad general. Alrededor de uno entre quinientos cuásares se ven implicados en un fenómeno relativista muy interesante: la desviación de la luz que emiten debido al efecto gravitacional de otras galaxias situadas entre el cuásar en cuestión y la Tierra, desde donde se observa este fenómeno, denominado «lentes gravitacionales», que había anunciado Einstein (1936) mucho antes de que fuesen detectadas.[159] El resultado de tal desviación es que se desdobla la imagen «madre».

En realidad, las lentes gravitacionales no son producidas únicamente por cuásares; también lo son por grandes acumulaciones de masas (como cúmulos de galaxias) que al desviar la luz procedente de, por ejemplo, galaxias situadas tras ellas (con respecto a nosotros) dan lugar, en lugar de a una imagen más o menos puntual, a un halo de luz, a la imagen «desdoblada» a la que me acabo de referir. Las lentes gravitacionales fueron observadas por primera vez en 1979, cuando Walsh, Carswell y Weyman (1979) descubrieron una imagen múltiple de un cuásar en 0957+561. Posteriormente, se han tomado fotografías con el telescopio espacial Hubble (del que hablaré enseguida) de un cúmulo de galaxias situado a unos mil millones de años-luz de distancia, fotografías en las que además de las galaxias que forman el cúmulo se observan numerosos arcos (trozos de aros) que se detectan con mayor dificultad debido a ser más débiles luminosamente. Estos arcos son en realidad imágenes de galaxias mucho más alejadas de nosotros que las que constituyen el propio cúmulo, pero que observamos mediante el efecto de lente gravitacional (el cúmulo desempeña el papel de la lente que distorsiona la luz procedente de tales galaxias). Además de proporcionar nuevas evidencias en favor de la relatividad general, estas observaciones tienen el valor añadido de que la magnitud de la desviación y distorsión que se manifiesta en estos arcos luminosos es mucho mayor del que se esperaría si no hubiese nada más en el cúmulo que las galaxias que vemos en él. De hecho, las evidencias apuntan a que estos cúmulos contienen entre cinco y diez veces más materia de la que se ve. ¿Se trata de la materia oscura de la que trataré más adelante?

III

NUEVAS VENTANAS ABIERTAS AL UNIVERSO

NUEVOS INSTRUMENTOS ASTRONÓMICOS

En el capítulo primero ya hice hincapié en lo mucho que depende el estudio del Universo de los medios de observación, a su vez dependientes de las posibilidades que ofrece la tecnología. En este mismo capítulo hemos comprobado cuánto se progresó en este estudio gracias a la «nueva astronomía» que exploraba rangos del espectro electromagnético distintos al óptico. Un paso más en la historia de la astronomía, astrofísica y cosmología fue el evitar el obstáculo de la atmósfera terrestre, instalando telescopios en satélites. Y en este punto es obligado referirse al telescopio espacial Hubble.[160]

La idea de colocar un telescopio en el espacio precedió, por supuesto, a la que condujo al Hubble. En 1940, por ejemplo, un astrónomo, Robert S. Richardson, que trabajó en los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, y que también contribuyó a la ciencia-ficción, especuló con la posibilidad de situar un telescopio con un espejo de 7,6 metros en la superficie de la Luna; no debe extrañarnos que publicase la idea en un número de la revista Astounding Science Fiction (Richardson 1940). Ahora bien, eran obvios los problemas: el primero es que se necesitaría un cohete para llevar el telescopio a la Luna, o para ponerlo en órbita alrededor de la Tierra, y no se disponía de tales vehículos. Sin embargo, esta situación comenzó a cambiar después de la Segunda Guerra Mundial, durante la cual los alemanes desarrollaron, guiados por Wernher von Braun los poderosos cohetes V-2 (de Vergeltungswaffe-2), algunos de cuyos ejemplares terminaron en poder de Estados Unidos, al igual que sucedió con Von Braun, que se trasladó (mejor, fue trasladado, sin que, eso sí, le importase mucho) a este país norteamericano donde pronto se convirtió en uno de los líderes de los proyectos espaciales de la NASA. En la década de 1960, la posibilidad de instalar un telescopio en un satélite espacial comenzó a tomarse en serio por algunos (pocos, la mayoría favorecía concentrarse en la astronomía basada en la Tierra), miembros de la comunidad de astrónomos, especialmente los estadounidenses, que junto a los soviéticos eran los únicos colectivos nacionales que podían pensar en obtener los recursos necesarios. El líder del pequeño grupo norteamericano que se estableció para conseguir que se construyese y lanzase un Large Space Telescope («Gran Telescopio Espacial»), como entonces se denominó, fue Lyman Spitzer, que desde 1947 era el director del Departamento de Astronomía de la Universidad de Princeton así como del Observatorio de la

Universidad (mantuvo los puestos hasta 1979).[161] Spitzer también estaba implicado en los trabajos destinados a fabricar bombas de hidrógeno: tras la decisión del presidente Truman de fabricar la superbomba, en 1951 se establecieron en la Universidad de Princeton dos laboratorios dedicados a la fusión, uno, denominado Matterhorn B (la B de «bomba»), dirigido por John A. Wheeler, y el otro, Matterhorn S (la S de Stellator, la «Máquina de las estrellas», el nombre con el que se bautizó al instrumento desarrollado para estudiar los plasmas de fusión), dirigido por Spitzer, que, no sorprendentemente dada su especialidad, estaba muy interesado en reacciones termonucleares controladas. Por su parte, Wheeler lo estaba en las reacciones explosivas, pero necesitaba del conocimiento básico que se generase en el laboratorio de Spitzer, en donde, de hecho, se llevaron a cabo importantes avances en la teoría de la fusión controlada y en el diseño del Stellator, aunque este probó ser menos interesante que el correspondiente aparato desarrollado por los soviéticos: el Tokamak. Todo esto hacía que Spitzer fuese un hombre influyente y bien situado en los círculos de poder, una circunstancia más que conveniente a la hora de poner en marcha proyectos de Big Science.

No obstante contar con un apoyo tan valioso, no fue fácil que el proyecto del telescopio se aprobase, ya que era muy costoso. La propuesta la presentó la NASA, obviamente la agencia que debía y podía controlar el proyecto, a la Casa Blanca y al Congreso en 1974, pero pasaron tres años hasta que se aprobó, tras superar duras batallas. El telescopio espacial Hubble ilustra lo que ha sido norma en prácticamente todos los proyectos de Big Science, que necesitan de recursos económicos extraordinarios. En su caso, la NASA, la Casa Blanca y el Congreso dieron finalmente su aprobación por más motivos que el de que, con él, se haría ciencia de primerísima calidad: los que apoyaban el proyecto prometieron también otros objetivos más apreciados en los círculos de poder: reforzar la base científico-tecnológica de Estados Unidos, proporcionar empleos en distritos y estados de algunos congresistas y senadores, ayudar a mantener el Centro de Vuelos Espaciales Marshall, de Huntsville, Alabama, promocionar lazos internacionales (por ejemplo, con la Agencia Espacial Europea —ESA; European Space Agency— que participó como un socio menor, aunque no despreciable: aportó el 15%). También ayudó la situación política: en 1975, con el inicio de la Administración del presidente Gerald Ford, la financiación federal para investigación básica, que había disminuido durante algunos años, volvió a crecer, recuperando el ritmo que la había caracterizado desde el final de la Segunda Guerra Mundial. Tal aumento en la financiación para I+D encajaba bien con la propuesta de la NASA de construir un telescopio espacial y fue

contemplada por la Administración Ford como un magnífico ejemplo del tipo de investigación que se deseaba promocionar.

La construcción del Hubble se inició en 1977 y fue larga, como suele suceder en proyectos de tal envergadura. Se lanzó, utilizando el transbordador espacial Discovery, el 24 de abril de 1990. Contiene un telescopio de 2,4 metros de diámetro, e instrumentos para recibir señales en el espectro visible, ultravioleta e infrarrojo. Cuando escribo estas líneas, continúa en funcionamiento, aunque ha tenido que sufrir varias reparaciones —la primera y más importante, sustituir un espejo defectuoso que producía imágenes distorsionadas por aberración. Las miles de imágenes y datos que ha suministrado a lo largo de todos estos años han sido esenciales para el desarrollo de la astrofísica y cosmología. Gracias a él, por poner algún ejemplo, por primera vez disponemos de fotografías de regiones (como la nebulosa de Orión) en las que parece que se está formando una estrella.

No lo he mencionado aún, pero es obligado referirse también a la importancia —en un grado mucho más amplio que el Hubble, esto es, afectando a un número más extenso de investigadores— que tuvo la sustitución de las máquinas y placas fotográficas por detectores digitales asociados a computadoras para recoger las imágenes y espectros astronómicos.[162] Los primeros tubos fotomultiplicadores que se utilizaron en astronomía —por Albert Whitford y Gerald Kron en el telescopio de 1,5 metros de Monte Wilson— fueron construidos en la primera mitad del siglo XX por Vladimir Zworykin en los laboratorios de RCA (Radio Corporation of America); se basan en el hecho de que un fotón incidente produce una cascada de electrones secundarios.[163] Entre los nombres destacados en el campo de la fotodetección se encuentra el de Alexander Boksenberg, del Real Observatorio de Greenwich (Inglaterra), que en 1972 construyó un detector (Image Photon Counting System) que permitía identificar la posición de llegada de un fotón y el instante en que había llegado. Este sistema transformó completamente la espectroscopia de objetos astronómicos lejanos, porque este tipo de detectores son ideales para tratar imágenes tenues puesto que el ritmo con el que se cuenta los fotones recibidos está limitado a, aproximadamente, un fotón por píxel durante el tiempo que tarda el sistema en registrar la llegada del fotón. La Cámara para Objetos Tenues del telescopio espacial Hubble utiliza esta tecnología para recoger las imágenes procedentes de la región ultravioleta del espectro.[164]

También los telescopios terrestres han mejorado notablemente a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Hasta comienzos de la década de 1990 el tamaño

máximo de los espejos de los telescopios ópticos instalados en la Tierra era de entre 5 y 6 metros de diámetro; el mayor telescopio de esa época, con un espejo primario (o colector) de 6 metros de diámetro, estaba en el Cáucaso ruso. Sin embargo, con espejos de ese tamaño se llegaba prácticamente al límite posible, porque el peso del espejo hace imposible evitar deformaciones que distorsionan gravemente las imágenes. La solución se consiguió recurriendo a un conjunto de espejos acoplados, cuya geometría es controlada por refinados sistemas electrónicos. Con esta técnica se han construido dos telescopios (Keck) de 9,8 metros de diámetro, propiedad del Instituto Tecnológico de California y de la Universidad de California, en Manua Kea, Hawai, a más de 4.000 metros de altitud. Con el primero, construido en la década de 1990, se observaría, en el cúmulo de las Pléyades, una enana marrón (PPL15), una estrella tan pequeña que no luce como las demás, por lo que nunca antes habían sido vistas, aunque sí detectadas en algún caso a través de sus efectos gravitacionales. En la actualidad, España también dispone de un telescopio, el «Gran Telescopio», de 10,4 metros: vio la primera luz en 2008 y está situado en el Roque de los Muchachos, en la isla canaria de La Palma y pertenece al Instituto de Astrofísica de Canarias.

Para finalizar esta sección, me referiré a la exploración espacial, un tema derivado, y en el fondo extensión, de los programas espaciales que condujeron a que el hombre pisase la Luna, y de los que ya traté en este mismo capítulo.

La carrera espacial entre la Unión Soviética y Estados Unidos, asunto del que también me ocupé anteriormente, tuvo otro efecto: el de la construcción de «estaciones espaciales», iniciativa en la que la Unión Soviética llevó la delantera, primero con la denominada Salyut, que terminó por estar constituida por 9 módulos espaciales, ensamblados, en una labor de artesanía espacial, entre 1971 y 1981. Luego llegó la Mir (el nombre ruso para «Paz» o «Mundo»), que daba una vuelta completa a la Tierra cada dos horas, a una altura de entre 300 y 400 kilómetros, y que se mantuvo operativa, con distintos equipos de astronautas que efectuaban estancias muy prolongadas, desde 1986 hasta 2001, pese a que inicialmente su vida se había estimado en 5 años (su final fue espectacular: se desintegró sobre el Océano Pacífico, el 23 de marzo de 2001, al reentrar en la atmósfera). No obstante su grandeza, la Mir no añadió demasiado a la tecnología espacial, aunque sí sirvió a los soviéticos para realizar estudios físicos y biológicos. Y no son pocos los que dicen algo parecido —que no aporta demasiado— de la sucesora de la Mir, la Estación Espacial Internacional, cuyos primeros módulos se instalaron en el espacio en 1998, en un ejemplo de colaboración, una vez desaparecida la Unión Soviética, entre Rusia y Estados

Unidos, aunque también participan en ella Japón, Canadá y la Agencia Espacial Europea (ESA). Lo que no se puede discutir es que constituye un prodigio tecnológico: orbita a unos 360 kilómetros de altura, da una vuelta completa a la Tierra cada 92 minutos, tiene 108 metros de longitud y 86 de ancho y un volumen habitable de 938 metros cúbicos para las diversas tripulaciones que se suceden en ella.

Más interesante que las estaciones espaciales son las numerosas misiones no tripuladas que han empleado sondas espaciales, entendiendo por tales vehículos no tripulados que después de ser lanzados por cohetes desechables se dirigen luego a algún destino, o destinos, dentro del Sistema Solar. Al ser sus destinos tan alejados, y más aún si se pretende que visiten (esto es, que se aproximen) objetivos diferentes, las sondas espaciales deben utilizar el empuje gravitacional de los cuerpos a los que se dirigen o que encuentran en su camino (también recurren, temporalmente, a motores propios).

El planeta Marte ha sido uno de los primeros y más señalados objetivos de estas sondas. Se trata de una elección natural: es vecino nuestro y en la dirección correcta, puesto que Venus se encuentra en la dirección «mala», al estar más cerca del Sol de lo que lo está la Tierra, y por tanto a mayor temperatura (la distancia de Marte al Sol es de 228 millones de kilómetros y la temperatura media en su superficie es de 63 grados centígrados bajo cero, mientras que Venus está a 108 millones de kilómetros del Sol y su temperatura media es de 464 grados centígrados positivos). Observado con detenimiento durante siglos, algunas peculiaridades de la geografía de Marte (como los famosos «canales») han llevado a pensar que puede haber, o haber habido, vida en él.

Después de cuatro intentos fallidos entre 1960 y 1962, la Unión Soviética consiguió que el 19 de junio de 1964 una sonda se acercara a poco más de 200.000 km de la superficie marciana, aunque fallos de comunicación del vehículo con la Tierra hicieron que la información recibida fuese escasa. Mejor suerte tuvieron los estadounidenses: una de las dos sondas que lanzaron en marzo de 1964, el Mariner 4, se aproximó a Marte el 15 de julio de 1965 a una distancia de unos 10.000 km, enviando 21 fotografías que mostraban cráteres del estilo de los lunares. Los datos enviados por el Mariner 4 mostraron un planeta sin estructuras ni canales (los observados anteriormente se trataban de ilusiones ópticas), socavando las esperanzas de todos los que pensaron en antiguas acciones de seres vivos.

Han sido muchas más las misiones dirigidas a Marte, de las que nos limitaremos a mencionar algunas particularmente relevantes. La primera, la soviética Marte 2, que se instaló en una órbita en torno al «Planeta Rojo», enviando un módulo «aterrizador» el 27 de noviembre de 1971, que desgraciadamente, y debido a un fallo de los motores, se estrelló contra la superficie. Su compañero, el Marte 3, sí tuvo éxito depositando su carga el 2 de diciembre de 1971, pero este módulo solo transmitió imágenes a la sonda en órbita durante 20 segundos. Fue, en cualquier caso, el primer «aterrizaje» sobre Marte de la historia.

Otro gran momento de la exploración marciana tuvo lugar el 20 de agosto de 1975, cuando despegó del Centro Espacial Kennedy de Florida (el antiguo Cabo Cañaveral) el Viking 1, que envió un módulo a la superficie de Marte el 20 de julio de 1976 (la parte que permaneció en órbita pesaba 900 kg y el módulo 600 kg). El 9 de septiembre de 1975, partía de la misma base su hermano, el Viking 2, que alcanzó Marte el 3 de septiembre de 1976. La última transmisión que llegó a la Tierra procedente de estos vehículos se produjo el 11 de noviembre de 1982. Uno de los objetivos de estas sondas era buscar indicios de vida en Marte, pero no se llegó a conclusiones definitivas. Todavía hoy se discute este punto, en particular si hay agua, tras misiones mucho más avanzadas como la del Mars Pathfinder (también norteamericana), que depositó el 4 de julio de 1997 un vehículo robot con 6 ruedas llamado Sojourner, del que se obtuvo grandes cantidades de información sobre la atmósfera y clima de Marte y la composición química de las rocas: estuvo funcionando hasta el 30 de agosto de ese año, enviando 1,2 gigabits (1,2 millones de bits) de datos, y más de 100.000 imágenes de la superficie marciana. La cuestión de si existe agua es importante, puesto que podría indicar si existe, o ha existido, algún tipo de vida. También se ha detectado la presencia de metano en cantidades que indican que se produce de una forma constante, aunque se ignora si es por actividades geológicas o, acaso, biológicas.

Naturalmente, no ha sido Marte el único objetivo de los esfuerzos humanos por conocer nuestro Sistema Solar. Venus ha sido otro objetivo temprano de las misiones espaciales. Los primeros en intentarlo fueron los soviéticos, pero su misión, Venera 1, que lanzaron el 12 de febrero de 1961, fracasó. En el verano de 1962, Estados Unidos lanzó dos sondas, la Mariner 1 y Mariner 2. La primera se perdió durante el lanzamiento, pero Mariner 2 llegó a Venus, acercándose a una distancia de 35.000 km, el 14 de diciembre de 1962, y pudo investigar las nubes que recubren el planeta y medir su temperatura y su campo magnético. En 1973, el Mariner 10, se acercó aún más, a 10.000 kilómetros de su superficie, y

más tarde, la sonda Magellan (1990) llegó a sumergirse en su entorno, atravesando su densa atmósfera —dominada por dióxido de carbono (que produce un intenso efecto invernadero) y que incluye también una niebla de ácido sulfúrico concentrado— que se extiende unos 45 kilómetros en altura. No obstante esta atmósfera, a partir de un determinado nivel el cielo venusiano es limpio y de gran visibilidad, aunque no por ello la situación es similar a la terrestre: la presión y la temperatura van aumentando según se desciende hacia la superficie del planeta y, al nivel del suelo, la presión es 94 veces superior a la presión atmosférica terrestre.

Están también otras misiones espaciales a distintos planetas, entre otras, las misiones Pioneer, las Voyager y Galileo. La Pioneer 10, lanzada en marzo de 1972, fue la primera en observar directamente al gigantesco Júpiter, el mayor de los planetas solares (su masa es 318 veces la de la Tierra, y está a 778 millones de kilómetros del Sol), mientras que la Pioneer 11 partía en abril de 1973, pasando por Júpiter para encaminarse después hacia Saturno, planeta fácilmente reconocible por los anillos que lo rodean por su ecuador (la masa de Saturno, el segundo planeta más grande del Sistema Solar, es 95 veces la de la Tierra, y está a 1.427 millones de km del Sol).

Gracias a estas y otras misiones similares, conocemos bastante mejor que todos los que nos precedieron nuestro entorno más cercano, el del Sistema Solar. Y aunque se trate de una minúscula parte del Universo, alguna satisfacción deberíamos encontrar en ello.

INFLACIÓN

Para introducir esta sección, recurriré a unas palabras de Alan Lightman (1999: 9): «El estudio de la cosmología experimentó un gran cambio conceptual en el decenio de 1970. Antes de esa época, los cosmólogos modernos se hacían preguntas como: ¿Cuál es la composición de las galaxias y qué lugar ocupan en el espacio? ¿A qué velocidad se expande el Universo? ¿Cuál es la densidad media de la materia en el cosmos? Después de esa época, en la «nueva cosmología» los cosmólogos comenzaron seriamente a hacerse preguntas como: ¿Por qué existe la materia, y cuál es su origen? ¿Por qué el Universo es tan homogéneo como es a través de distancias tan inmensas? ¿Por qué la densidad cósmica de la materia es tal que la energía de la expansión del Universo es compensada casi exactamente por su energía de atracción gravitacional? En otras palabras, la naturaleza de las preguntas cambió. Las preguntas se dirigieron a aspectos más fundamentales».

La cuestión de por qué el Universo es tan homogéneo en distancias inmensas, es lo que se denomina el «problema de horizonte» y básicamente consiste en lo siguiente: regiones que en la actualidad se encuentran separadas por distancias enormes, poseen las mismas propiedades físicas —por ejemplo, la temperatura —, incluso cuando, según la teoría estándar del Big Bang, debieron estar demasiado alejadas entre sí en el momento en que emitieron radiación como para haber podido interaccionar y alcanzar un estado de equilibrio. El mejor ejemplo es la radiación de microondas que procede del Big Bang, que muestra una gran homogeneidad e isotropía, aunque al ser emitida cuando el Universo tenía, aproximadamente, unos 300.000 años de edad, las regiones de él más alejadas entre sí lo estaban por distancias superiores a las que podría haber viajado la luz, o el calor, desde el Big Bang. Otro ejemplo lo proporcionan los cuásares más distantes del hemisferio norte celeste y los más distantes del hemisferio sur: cuando los observamos estamos contemplando objetos que no pueden haber interaccionado entre sí, pues la distancia que los separa es mayor que la distancia que la luz puede recorrer en el tiempo transcurrido desde el Big Bang hasta el presente. En otras palabras: en el «Universo primitivo» no habría sido posible que regiones distintas «llegasen a un equilibrio».

El segundo gran problema, el por qué la densidad cósmica de la materia es tal

que la energía de la expansión del Universo es compensada casi exactamente por su energía de atracción gravitacional, es lo que se denomina «problema de la planitud». Expresado de forma ligeramente diferente, se trata de preguntarse por qué la densidad media actual del Universo es prácticamente igual a la densidad crítica, esto es, a la densidad que el Universo debería tener para que su velocidad de expansión bastase para sobreponerse a la fuerza gravitacional que tira de él, de manera que la expansión no se detenga nunca.

La respuesta a estos problemas, que en la teoría del Big Bang únicamente podía darse suponiendo la existencia de unas increíblemente precisas condiciones iniciales (y las condiciones iniciales se suponen, no se explican), —condiciones como la igualdad física entre todos los puntos del Universo—, provino de un dominio diferente al de la física relativista y la astrofísica: del campo cuántico. Su «mensajero» fue Alan Guth (n. 1947). Graduado (1969) y doctorado (1972) en el Massachusetts Institute of Technology como físico teórico de altas energías, Guth se vio influido por una reducida sucesión de acontecimientos que le llevaron a producir el trabajo por el que es recordado. La primera de esas influencias provino de una conferencia de Robert Dicke, a la que asistió en el otoño de 1978, en la que Dicke habló del problema de la planitud. También por entonces, su contemporáneo, el físico teórico, más inclinado hacia la cosmología, el chino-estadounidense Sze-Hoy Henry Tye, le preguntó sobre un tema en el que Guth había trabajado: los monopolos magnéticos (unas posibles partículas estables y pesadas que podrían imaginarse como densos nudos de campo magnético).

Podía haberme referido antes a estos entes cuánticos, puesto que se trata de otra de las tan originales como innovadoras ideas, sustanciadas en sólidas razones teóricas, debidas a Paul Dirac. «El objeto de este artículo», escribía cuando introdujo la idea (Dirac 1931: 71), «es demostrar que la mecánica cuántica no impide la existencia de polos magnéticos aislados. Por el contrario, cuando se desarrolla, sin imponer restricciones arbitrarias, el actual formalismo de la mecánica cuántica conduce inevitablemente a ecuaciones de onda cuya única interpretación física es el movimiento de un electrón en el campo de un solo polo. Este nuevo desarrollo no requiere ningún tipo de cambio en el formalismo cuando se expresa en términos de símbolos abstractos que denotan estados observables, sino que es meramente una generalización de las posibilidades de representación de estos símbolos abstractos por funciones de onda y matrices. Bajo estas circunstancias uno se sorprendería si la Naturaleza no hubiera hecho uso de él».[165]

Tye estaba trabajando entonces en las teorías de gran unificación, esto es, en el problema de la unificación de las fuerzas débil, electromagnética y fuerte, un tema del que me ocuparé en el siguiente capítulo. Lo que le preguntó a Guth fue si las teorías de gran unificación darían lugar a monopolos magnéticos, pero recordaría Guth años después (Lightman y Brawer 1990: 471) «entonces yo no tenía realmente idea de lo que eran las teorías de gran unificación, de forma que tenía que enseñarme [Tye] lo que eran, cosa que hizo». Conocidas estas, Guth dedujo que, efectivamente, en ellas se producían monopolos magnéticos, pero «que no eran el tipo de cosas que uno esperaría encontrar, porque pesarían algo así como 10^{16} GeV». Ante lo cual, Tye respondió: «¿Por qué no intentas calcular cuántos [monopolos magnéticos] se habrían producido en el Big Bang?». Pero Guth no había trabajado nunca en cosmología y se resistió inicialmente a abordar semejante problema.

Entre medias, surgió otra de las influencias a las que me refería antes: una visita que Steven Weinberg, uno de los grandes especialistas en teorías de gran unificación, hizo en 1979 a la Universidad de Cornell, donde entonces estaba Guth. Allí, Weinberg dio varias conferencias sobre ese tema: «Fue realmente su trabajo lo que me convenció de que el Universo temprano era una cuestión lo suficientemente bien definida como para que tuviese sentido trabajar sobre él, y que las teorías de gran unificación eran lo suficientemente interesantes como para aplicarlas al Universo temprano» (Lightman y Brawer 1990: 472). Fue a partir de ese momento cuando Guth se dedicó realmente a trabajar con Tye en el problema que este le había planteado. En 1980 publicaron un artículo (Guth y Tye 1980) en el que, bajo ciertas suposiciones, mostraban que los monopolos magnéticos no abundarían en el Universo, un resultado en el que se le adelantó, parcialmente, un estudiante de Weinberg, John Preskill (1979). Desde entonces, la búsqueda de monopolos magnéticos ha sido tema de investigación, hasta la fecha con resultados negativos; solamente existe una posible evidencia, debida al físico de la Universidad de Stanford, Blas Cabrera (1982), que ha defendido que detectó uno en la noche del 14 de febrero de 1982.[166]

Esta investigación influyó notablemente en el pensamiento de Guth. Las teorías de gran unificación predicen que tiene que producirse una transición de fase a temperaturas del orden de 10^{27} grados Kelvin.[167] Esto condujo a Guth y a Tye a la idea de «superenfriamiento», pero en el artículo que publicaron ignoraron completamente el efecto que la transición de fase podría tener sobre el Universo. Posteriormente Guth recordaba (Lightman y Brawer 1990: 473) que «a comienzos de diciembre de 1979 me senté y pensé en ello. Y cuando lo hice, una

excitante noche, me di cuenta de que conduciría a una expansión exponencial, y entonces también comprendí el problema de Dicke, el problema de la planitud, lo suficientemente bien como para entender que resolvería el problema de la planitud». En otras palabras, Guth llegó a la conclusión de que el Universo había experimentado un breve periodo de inflación en el que la expansión tuvo lugar a un ritmo extraordinariamente rápido, un ritmo exponencial. Recurriendo a sus propias palabras (Guth 1999: 219-220):

La inflación cósmica implica que el Universo observable surgió en una región muy pequeña, en la que todas sus partes estaban lo bastante próximas entre sí como para estar en contacto causal [...] Partes del Universo que se hallan ahora a gran distancia estaban, en la época anterior a la inflación, próximas entre sí. Esto resuelve el problema del horizonte: nuestro Universo era isótropo antes de la inflación y por eso actualmente parece isótropo a grandes escalas. El colosal estiramiento de la geometría alisó todas las arrugas y baches que pudieran haber existido al principio. Además, con el cambio espectacular de temperatura y la aceleración de la expansión, el Universo ya no pudo producir una gran densidad de monopolos magnéticos.

Más concretamente, la expansión «se inició solo 10-34 segundos después del Big Bang, cuando la distancia que podía recorrer la luz en esos 10-34 segundos era solo de 3·10-26 metros. La expansión exponencial tuvo lugar entre los 10-34 y 10-32 segundos, tiempo en el que la escala del Universo se incrementó en un factor de 10^{43}; esto es, llegó a los $3 \cdot 10^{7}$ metros. En la actualidad, debido a la expansión del Universo, ese tamaño ha alcanzado los $3 \cdot 10^{42}$ metros» (Ostriker y Mitton 2014: 171).

La presentación pública de su idea, la teoría de la inflación, tuvo lugar en un seminario que Guth impartió en el Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) el 23 de febrero de 1980. Lo tituló «10-35 segundos después del Big Bang»: «Estuve un poco nervioso mientras preparaba el seminario», recordó (Guth 1999: 221-222), «pues seguía preocupándome que alguna consecuencia de la teoría pudiera resultar espectacularmente errónea. Tenía también el temor de que pudiera salir a relucir mi condición de cosmólogo reciente. Para ponerme al día en cuanto a conocimientos generales de cosmología, había estudiado el excelente

libro de nivel popular de Steven Weinberg, Los tres primeros minutos del Universo».

No es de extrañar el nerviosismo de Guth. Aparte de la novedad de su teoría, era, efectivamente, un novato en el campo de la cosmología. Uno más de los, cada vez más numerosos científicos, procedentes de la física teórica de altas energías, que se adentraban en el estudio de la cosmología, de los primeros instantes de existencia del Universo. El que se refiriera al libro de Weinberg, The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe (Weinberg 1977 a), es natural, pues esta obra constituyó un elemento destacado en la apertura de la cosmología y astrofísica a los físicos de altas energías; ¿quién sino ellos podían tratar de un escenario dominado por las reacciones subnucleares? Aquí tenemos una muestra de uno de los fenómenos más importantes que han tenido lugar en la física de la segunda mitad del siglo XX: la reunión de la cosmología, ciencia de «lo grande», y la física de altas energías, ciencia de «lo pequeño»; naturalmente, el momento de encuentro ha sido los primeros instantes de vida del Universo, cuando las energías implicadas fueron gigantescas (volveré a este asunto en el capítulo 3).

Pero continuando con los recuerdos de Guth:

Comencé el seminario exponiendo la teoría estándar del Big Bang y el problema de los monopolos magnéticos, revisando los razonamientos de Preskill que indicaban un gran exceso de producción de monopolos. A continuación describí el trabajo de Henry [Tye] y mío, mostrando cómo el problema de los monopolos podía eludirse en virtud del superenfriamiento. Finalmente, presenté la teoría inflacionaria, mostrando cómo resolvería no solo el problema de los monopolos, sino también los problemas de la planitud y el horizonte. El seminario avanzó sin problemas, aunque duró una hora y media, una hora más de lo previsto.

La asistencia al seminario fue numerosa, y las reacciones posteriores fueron muy alentadoras. Sidney Coleman me dijo que había sido el mejor seminario del curso. Le pedí sugerencias para recortarlo a fin de llevar el seminario a la duración normal, a lo que me respondió: «Nada; cada palabra ha sido oro puro». Viniendo de un físico de prestigio, a quien yo respetaba tanto como a Sidney, aquellas palabras sonaban a un triunfo que superaba mis expectativas más descabelladas.

El correspondiente artículo no apareció hasta el año siguiente, bajo el título «Universo inflacionario: una posible solución a los problemas del horizonte y de la planitud» (Guth 1981).

Este trabajo pionero de Guth tuvo algunos correlatos, sobre todo procedentes de la Unión Soviética, donde algunos científicos también se ocupaban de los problemas de la planitud y del horizonte. El más notable de estos físicos fue Andrei Linde, también entrenado en el campo de la física de altas energías. En el modelo de Linde (1982) aparece lo que se denomina «inflación caótica», en la que el Universo está desdoblándose continuamente en regiones (burbujas) que no se afectan entre sí y que pueden tener propiedades completamente diferentes; son, de hecho, universos paralelos.[168]

ARRUGAS EN EL TIEMPO

Bien, la inflación da origen a un universo uniforme, pero entonces ¿cómo surgieron las minúsculas desviaciones de la homogeneidad primordiales de las que habrían nacido, al pasar el tiempo y actuar la fuerza gravitacional, estructuras cósmicas como las galaxias?

Formulada de esta manera parece una pregunta obvia, pero durante mucho tiempo muy pocos, si es que alguno, se la planteó: las galaxias simplemente estaban ahí, constituían las unidades fundamentales del Universo (una vez, claro está, que quedó claro que la Vía Láctea, nuestra galaxia, no agota todo el Universo). Sin embargo, a comienzos, al menos, de la década de 1980, la cuestión comenzó a pasar a un primer plano. Un buen ejemplo en este sentido es lo que manifestó Jeremiah Ostriker (1982: 473) en su presentación en la reunión que sobre «Cosmología astrofísica» tuvo lugar en la Ciudad del Vaticano, del 28 de septiembre al 2 de octubre de 1981, organizada por la Academia Pontificia de Ciencias (Pontificae Academiae Scientiarum):[169]

Tal y como lo vemos alrededor nuestro, el Universo es tan poco homogéneo

como puede ser mientras sea consistente con nuestra propia existencia y las leyes conocidas de la física. En todas las escalas, desde la del Sistema Solar hasta la del super-cúmulo (supercluster) local (de 10^{13} cm a 10^{26} cm), encontramos que la mayor parte de la masa aparece en objetos (planetas, estrellas, galaxias, agrupaciones) que ocupan una pequeña fracción del volumen. En estas mismas escalas, vemos anisotropías muy significativas: si imaginamos esferas centradas en la Tierra divididas por el plano ecuatorial, entonces la diferencia en masa contenida en los hemisferios norte y sur sería una fracción significativa de la masa total de cada esfera, en todas las escalas entre 10^{13} y 10^{26} cm.

Sin embargo, cuando observamos el Universo en la mayor escala posible, estudiando el fondo de microondas emitido con un desplazamiento hacia el rojo de z ~ 1.000 y una distancia a nosotros de aproximadamente 10^{28} centímetros, encontramos un extraordinario grado de isotropía [...] ¿Cómo creció tanta estructura de semejantes comienzos uniformes? Esta es posiblemente la cuestión más importante en la cosmología actual.

De hecho, el propio Ostriker apuntaba una posible solución para desvelar el enigma: perturbaciones de origen desconocido en el Universo temprano que se manifestarían en el fondo de radiación de microondas.[170] Y si se piensa en «fluctuaciones» en el Universo temprano, no es irrazonable pensar en las que permite la física cuántica (en especial la teoría cuántica de campos), para la que el vacío «no está realmente vacío»; esto es, pensar en fluctuaciones del vacío. Recordemos que el principio de incertidumbre de Heisenberg aplicado a energías y tiempo ($\Delta E \cdot \Delta t \geq h$) permite que se cree una partícula y su antipartícula (un par electrón-positrón, por ejemplo) durante un brevísimo periodo de tiempo. Ahora bien, los efectos que la gravedad cuántica puede tener sobre el espacio-tiempo se han explorado (teóricamente) principalmente en el escenario que proporciona el interior de agujeros negros. La posibilidad que ofrece el principio de Heisenberg fue utilizada por Hawking en su teoría de la radiación de los agujeros negros: si se produce un par partícula-antipartícula en las proximidades del horizonte, donde las fuerzas de marea son gigantescas, es posible que una de las partículas caiga al interior del agujero negro mientras que la otra se escape, dando lugar a radiación. Por otra parte, está la idea, debida a John Wheeler, de que en regiones del tamaño del orden de 10-33 cm. (la denominada «longitud de Planck», o a veces «de Planck-Wheeler») el espacio-tiempo es como una espuma cuántica: las fluctuaciones del vacío son tan enormes que el espacio tal como lo

conocemos «hierve» y se convierte en borbotones de espuma cuántica.[171]

En el caso de la creación del Universo, una propuesta radical vino del físico del Hunter College de la City University de Nueva York, Edward P. Tryon, que propuso que el Universo surgió del vacío, de la nada. Da una idea de su tesis, la siguiente cita tomada del artículo con el que la presentó (Tryon 1973: 397), titulado «¿Es el Universo una fluctuación del vacío?»:

Uno se puede preguntar cómo podría tener lugar una fluctuación del vacío en tan gran escala [como se requiere para dar lugar al Universo]. Mi respuesta tiene dos partes. La primera es que las leyes de la física no ponen ningún límite a la escala de las fluctuaciones del vacío. La duración está restringida, por supuesto, por $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$, pero esto solo implica que nuestro Universo tiene energía cero; lo que he explicado es plausible.

La segunda parte de mi respuesta se encuentra en el principio de selección biológica, que sostiene que cualquier universo en el que existan seres sintientes es necesariamente hospitalario a seres sintientes. No pretendo que universos como el nuestro aparezcan con frecuencia, simplemente que la frecuencia esperada no es cero. Fluctuaciones del vacío de la escala de nuestro Universo son probablemente bastante raras. La lógica de la situación, sin embargo, dicta que siempre se hallan observadores en universos capaces de generar vida, y tales universos son impresionantemente grandes.

No entraré en los argumentos que daba Tryon para justificar que la energía del Universo sea cero, cuando se ha «creado» energía positiva en forma de partículas, únicamente mencionaré que se basaba en que la energía almacenada en el campo gravitacional es negativa. Sí haré notar que la segunda parte de su argumentación no era sino una forma del, para quien escribe, poco convincente —es algo así como una tautología, que no explica nada— pero célebre «principio antrópico». En cualquier caso, e independientemente de lo sugerentes que sean las ideas de Tryon, todavía contienen demasiados puntos oscuros.

Sean cuales sean los orígenes y naturaleza de las ultramicroscópicas fluctuaciones cuánticas que en el Universo temprano, anterior al periodo inflacionario, produjeron inhomogeneidades, estas se verían ampliadas

enormemente durante la inflación, y de ellas surgirían después las estructuras —las galaxias principalmente— que vemos en el Universo. Si no hubieran existido esas fluctuaciones primordiales, entonces el Universo tendría que ser completamente homogéneo, lo que, afortunadamente, no es el caso (de serlo, no existiríamos).

A la vista de esto, los físicos se plantearon encontrar esas inhomogeneidades, y ¿dónde mejor que en el fondo de radiación de microondas?

Tal fue el programa de investigación que abordó un equipo de científicos estadounidenses a cuya cabeza estaban John C. Mather y George Smoot. Cuando la NASA aprobó en 1982 fondos para la construcción de un satélite —el Cosmic Background Explorer (COBE), que fue puesto en órbita, a 900 kilómetros de altura, en el otoño de 1989— para estudiar el fondo cósmico de microondas, Mather se encargó de coordinar todo el proceso, así como del experimento (en el que utilizó un espectrofotómetro enfriado a 1,5° K) que demostró que la forma del fondo de radiación de microondas se ajustaba a la de una radiación de cuerpo negro a la temperatura de 2,735° K, mientras que Smoot midió las minúsculas irregularidades en esa temperatura predichas por la teoría de la inflación. Diez años después, tras haber intervenido en los trabajos más de mil personas y con un coste de 160 millones de dólares, se anunciaba (Mather et al. 1990; Smoot et al. 1992) que el COBE había detectado lo que Smoot denominó «arrugas» del espacio-tiempo, las semillas de las que surgieron las complejas estructuras que ahora vemos en el Universo.[172]

Podemos captar algo de la emoción que sintieron estos investigadores al comprobar sus resultados, a través de un libro de divulgación que Smoot publicó poco después, Wrinkles in Time (Arrugas en el tiempo). Escribió allí (Smoot y Davidson 1994, 336):

Estaba contemplando la forma primordial de las arrugas, podía sentirlo en mis huesos. Algunas de las estructuras eran tan grandes que solo podían haber sido generadas durante el nacimiento del Universo, no más tarde. Lo que tenía ante mí era la marca de la creación, las semillas del Universo presente.

En consecuencia, «la teoría del Big Bang era correcta y la teoría de la inflación

funcionaba; el modelo de las arrugas encajaba con la formación de estructuras a partir de la materia oscura fría; y la magnitud de la distribución habría producido las estructuras mayores del Universo actual bajo el influjo del colapso gravitacional a lo largo de 15.000 millones de años».

MATERIA Y ENERGÍA OSCURAS

Cuando se estudia el Universo, uno de los problemas obvios, y al que aún no he tenido oportunidad de referirme, es el de cuánta materia-energía contiene. De entrada, dependiendo de cuánta haya, el Universo puede estar siempre expandiéndose o llegar un momento en el que la «resistencia gravitacional» producida por su contenido material-energético haga que comience a contraerse, hasta llegar, finalmente, a un Big Crunch (Gran Colapso). Los métodos básicos para resolver tal cuestión eran dos: sumar la masa contenida en un pequeño volumen, medir el ritmo de expansión de ese volumen y ver si la gravedad debida a esa masa bastaba para acabar deteniendo la expansión y provocar un nuevo colapso. O bien, llevar a cabo meticulosas mediciones de la constante de Hubble y su variación. Los esfuerzos de astrofísicos como Alan Sandage para medir directamente la deceleración apuntaban en la dirección de un universo cerrado que probablemente iba a volver a colapsar, pero las mediciones directas de la densidad de masa efectuadas por el astrónomo holandés Jan Oort y otros indicaban que había demasiado poca masa en las galaxias como para que eso sucediese. Esta situación se mantuvo hasta la década de 1960 y provocó numerosos debates. Pero centrémonos ahora en la cuestión del contenido de masa del Universo.

La primera y obvia forma de resolver este problema es intentar determinar la masa que se ve y calcular su densidad en el conjunto del Universo. La duda es siempre si vemos todo lo que hay. En principio semejante duda se aplica a si vemos solo, por ejemplo, las estrellas o galaxias brillantes pero no las más tenues (las estrellas brillantes quizá representan solo una décima parte de toda la masa de las estrellas), cuántos planetas, cometas, polvo o gas interestelar habrá que apenas vislumbramos, o incluso a cuántos agujeros negros existen.

En la década de 1930, Fritz Zwicky, el astrofísico de origen suizo instalado a partir de 1925 en el Instituto Tecnológico de California, con quien ya nos hemos encontrado, se dio cuenta de un nuevo problema. En 1933, utilizando las facilidades del Observatorio de Monte Wilson, Zwicky realizó los primeros estudios de cúmulos (clusters) de galaxias. Para estimar la masa total de las agrupaciones, empleó un método que ya había sido utilizado por Eddington (1916) y que se basaba en la teoría cinética de gases. El resultado, sorprendente,

fue que había mucha más masa en el cúmulo de la que se podía atribuir a la masa visible de las galaxias que lo formaban: en el cúmulo de Coma, por ejemplo, en el que se han identificado más de mil galaxias, Zwicky (1933, 1937) encontró que debía existir una masa «oculta» más de 100 veces mayor que la visible.

Sorprendentes como eran, los resultados de Zwicky apenas llamaron la atención. Hubo que esperar hasta 1973, cuando Jeremiah Ostriker y James Peebles (1973) defendieron la tesis de que las galaxias en rotación observadas se habrían «deshecho» se habrían hecho inestables de un modo incontrolado, salvo que existiese un gran halo de masa invisible que las mantuviera unidas.[173] Aquello fue la primera predicción moderna de la existencia de lo que se terminó denominando «materia oscura» (que es posible detectar gracias a que, al igual que la masa ordinaria, es activa gravitacionalmente).

Investigaciones posteriores han confirmado la existencia de la materia oscura.[174] Se cree que constituye en torno al 27 por ciento de toda la materia del Universo. ¿Cuál es su naturaleza? Ese es uno de los problemas, de los mayores, que tiene planteada la ciencia actual; puede tratarse de estrellas muy poco luminosas (como las enanas marrones), de partículas elementales exóticas o de agujeros negros. No podremos entender realmente lo que son las galaxias, o cómo se formaron, hasta que sepamos qué es esa materia oscura. Ni tampoco podremos saber cuál será el destino último de nuestro Universo.

Junto al problema de la materia oscura, otro parecido adquirió prominencia en la última década del siglo XX: el de la energía oscura. Estudiando un tipo de supernovas, un grupo dirigido por Saul Perlmutter (del Laboratorio Lawrence en la Universidad de Berkeley, California), otro por Brian Schmidt (Observatorios de Monte Stromlo y Siding Spring, en Australia), y un tercero por Adam Riess (Johns Hopkins University y Space Telescope Science Institute), llegaron a la conclusión que, al contrario de lo supuesto hasta entonces, la expansión del Universo se está acelerando (Perlmutter et al. 1998; Schmidt et al. 1998; Riess et al. 1998). El problema es que la masa del Universo no puede explicar tal aceleración; había que suponer que la gravedad actuaba de una nueva y sorprendente manera: alejando las masas entre sí, no atrayéndolas. Se había supuesto que para propulsar el Big Bang debía de haber existido una energía repulsiva en la creación del Universo, pero no se había pensado que pudiera existir en el Universo ya maduro.

Una nueva energía entraba así en acción, una energía «oscura» que reside en el

espacio vacío. Y como la energía es equivalente a la masa, esta energía oscura significa una nueva aportación a la masa total del Universo, distinta, eso sí, de la materia oscura. Se tiene, así, que alrededor del 5 por ciento del Universo está formado por masa ordinaria, el 27 de materia oscura y el 68 por ciento de energía oscura. En otras palabras: creíamos que conocíamos eso que llamamos Universo y resulta que es un gran desconocido. Porque ni sabemos qué es la materia oscura ni lo qué es la energía oscura. Una posible explicación de esta última se podría encontrar en un término que introdujo Einstein en 1916-1917 en las ecuaciones de campo de la relatividad general. Como vimos, al aplicar su teoría de la interacción gravitacional al conjunto del Universo Einstein buscaba encontrar un modelo que representase un universo estático y ello le obligó a introducir en sus ecuaciones un nuevo término, una constante cosmológica, que en realidad representaba un campo de fuerza repulsiva, para compensar el efecto atractivo de la gravitación. Al encontrarse soluciones de la cosmología relativista que representan un universo en expansión y demostrarse observacionalmente (Hubble) que el Universo se expande, Einstein pensó que no era necesario mantener aquella constante, aunque podía incorporarse sin ningún problema en los modelos expansivos teóricos. No es sorprendente, por consiguiente, que no sean pocos los físicos que se han planteado rescatarla.[175] Ahora bien, semejante rescate no se podrá limitar a incluirla de nuevo en la cosmología relativista; esto ya no basta: es preciso que tome su sentido y lugar en las teorías cuánticas que intentan insertar la gravitación en el edificio cuántico; al fin y al cabo la energía oscura es la energía del vacío, y este tiene estructura desde el punto de vista de la física cuántica.

En 2011, la Academia Sueca reconocía la importancia del descubrimiento de la energía oscura concediendo el Premio Nobel de Física a Saul Perlmutter, que recibió la mitad, adjudicando la otra mitad a Brian P. Schmidt y a Adam G. Riess.

PLANETAS EXTRASOLARES

Para cerrar este ya largo, demasiado largo, capítulo, voy a tratar de un descubrimiento relativamente reciente, referido al Universo, por supuesto, pero que posee además una dimensión que le hace particularmente cercano a nosotros, habitantes de un planeta.

Gracias al avance tecnológico, los científicos están siendo capaces de ver nuevos aspectos y objetos del cosmos, como, por ejemplo, la existencia de sistemas planetarios asociados a estrellas que no sean el Sol. La búsqueda de planetas en otros sistemas solares comenzó en realidad en la década de 1940, pero durante medio siglo no se obtuvo ningún resultado fiable: el problema era que la «marca» de un planeta que orbite a una estrella es extremadamente débil; en nuestro Sistema Solar, por ejemplo, toda su masa está prácticamente concentrada en el Sol, que es mil millones de veces más luminoso que el planeta más grande, Júpiter. El mejor método para detectar planetas extrasolares es buscar pequeñas perturbaciones en el movimiento periódico de estrellas, perturbaciones que no se puedan explicar en base a los cuerpos que se observan.

En la década de 1960, astrónomos del Observatorio Sproul, en Swarthmore, Pensilvania, anunciaron que habían encontrado pequeños movimientos periódicos en cinco estrellas cercanas, movimientos del tipo que se esperaría en sistemas solares que contuvieran planetas gigantes con órbitas de gran excentricidad, pero estos resultados fueron descartados por medidas posteriores. El primer hallazgo fiable se produjo en 1992, cuando Alex Wolszczan y Dale Frail descubrieron que al menos dos planetas del tipo de la Tierra orbitan alrededor de un púlsar (Wolszczan y Frail 1992). La técnica que emplearon se basaba en la utilización del efecto Doppler para medir los movimientos radiales del púlsar. Tres años más tarde, Michel Mayor y Didier Queloz hicieron público que habían descubierto un planeta del tamaño y tipo de Júpiter (un gigante gaseoso) orbitando en torno a la estrella 51 Pegasi (Mayor y Queloz 1995).[176] Desde entonces el número de planetas extrasolares conocidos ha aumentado considerablemente y continuará haciéndolo, evidentemente. Y si existen tales planetas, acaso en alguno también se haya desarrollado vida. Ahora bien, aunque la biología que se ocupa del problema del origen de la vida no descarta que, en entornos lo suficientemente favorables, las combinaciones de elementos

químicos puedan producir, debido a procesos sinérgicos, vida, esta no tiene por qué ser vida del tipo de la humana. La biología evolucionista, apoyada en los registros geológicos, ha mostrado que la especie humana es producto del azar evolutivo. Si, por ejemplo, hace 65 millones de años no hubiese chocado contra la Tierra, a una velocidad de aproximadamente treinta kilómetros por segundo, un asteroide o un cometa de unos diez kilómetros de diámetro, produciendo una energía equivalente a la que librarían cien millones de bombas de hidrógeno, entonces acaso no habrían desaparecido (no, desde luego, entonces) una cantidad enorme de especies vegetales y animales, entre las que se encontraban los dinosaurios, que no dejaban prosperar a los, entonces, pequeños mamíferos, que con el paso del tiempo terminarían produciendo, mediante procesos evolutivos, especies como la del homo sapiens.

Precisamente por semejante aleatoriedad es por lo que no podemos estar seguros de que exista en otros planetas, en nuestra galaxia o en otra, vida inteligente que trate, o haya tratado, de entender la naturaleza construyendo sistemas científicos, y que también se haya planteado el deseo de comunicarse con otros seres vivos que puedan existir en el Universo. Aun así, desde hace tiempo existen programas de investigación que rastrean el Universo buscando señales de vida inteligente. Programas como el denominado SETI, siglas del «Search of Extra-Terrestrial Intelligence» («Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre»). Iniciado a finales de la década de 1950, este programa debe mucho al astrónomo Frank Drake, el autor de una famosa ecuación, que dio a conocer en 1961, en la que realizó una, ciertamente aventurada y muy cuestionable, estimación del número de civilizaciones extraterrestres con tecnología lo suficientemente desarrollada como para permitir que pudiésemos entrar en contacto con ellas. El vehículo para poder realizar semejante contacto, no puede ser otro que los radiotelescopios, como argumentaron dos físicos de la Universidad de Cornell, Giuseppe Cocconi y Philip Morrison, en un artículo que publicaron en septiembre de 1959 en la revista Nature. «Los lectores», escribían en él (Cocconi y Morrison 1959: 846), «pueden pensar que estas especulaciones caen completamente en el campo de la ciencia ficción. En su lugar, nosotros proponemos que la anterior línea de argumentos demuestra que la presencia de señales interestelares es completamente consistente con todo lo que sabemos ahora, y que si existen tales señales, ya están disponibles los medios para detectarlas [...] Es difícil estimar la probabilidad de éxito, pero si nunca buscamos, esa probabilidad es cero».

Este artículo causó sensación en los medios astronómicos y ayudó a que Otto

Struve, el director del centro en el que trabajaba Drake, el Observatorio Nacional de Radioastronomía de Green Park, en Virginia —quien llevaba tiempo pensando en los mismos términos— autorizase a emprender una búsqueda. El programa en cuestión, bautizado con el nombre de «Ozma», se puso en marcha en 1960, utilizando un nuevo radiotelescopio —con un disco de 27 metros de diámetro— que había entrado en funcionamiento. Se centró en dos estrellas cercanas, Tau Ceti y Epsilon Eridani; entre abril y julio de 1960, trabajando seis horas al día, se examinaron las radiaciones y sonidos que llegaban de esas estrellas buscando regularidades que pudiesen seguir la secuencia de los números primos o los dígitos del número pi, pero no se encontró nada revelador.

No se desanimó por ello Drake, quien continuó empeñado en la búsqueda, para la que contó a partir de 1974 con el mayor radiotelescopio del mundo, un gigantesco disco de 305 metros de diámetro, instalado, aprovechando una hondonada natural, en Arecibo (Puerto Rico).[177] Aunque el avance de la electrónica permite desarrollar búsquedas mucho más completas que las del viejo Proyecto Ozma, y de que existen más radiotelescopios que emplean pate de su tiempo en la búsqueda de señales de vida «inteligente» extraterrestre, aún no se ha detectado nada que indique que exista. ¿Será cierto que «estamos solos en el Universo»? Personalmente, lo dudo. Estoy convencido de que habrá surgido vida en muchos otros planetas; otra cosa es, naturalmente, que esa vida sea de tal tipo que haya conducido a plantearse cuestiones como las que nuestra especie, homo sapiens, se ha planteado y plantea; que sea vida, en este sentido, «inteligente».

3

EL MUNDO CUÁNTICO

I

PARTÍCULAS «ELEMENTALES»: LA FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

Una de las ramas de la física más activa durante la segunda mitad del siglo XX fue la que se denominó primero «física de partículas elementales» y luego, cuando la «elementalidad» de un número creciente de esas partículas quedó, inevitablemente, en cuestión, «física de altas energías», al ser necesarias grandes energías para ponerlas de manifiesto experimentalmente. Se trata de un campo científico extraordinariamente complejo y extenso, por lo que aquí únicamente podré ofrecer un bosquejo de él, seleccionando los, en mi opinión, desarrollos más destacados. Asimismo, este campo de la física de altas energías no se puede comprender si solo se tiene en cuenta su dinámica interna, la propia de la secuencia, interdependiente, de desarrollos teóricos y experimentales. Precisamente por la gran importancia que tienen en esta rama de la física los experimentos, y el enorme coste económico de estos, que ha necesitado de un especial apoyo estatal, es casi imperativo comenzar introduciendo los instrumentos imprescindibles en esta rama de la física. Los aceleradores de partículas.

ROLF WIDERÖE, ERNEST LAWRENCE Y EL CICLOTRÓN

En 1911, Ernest Rutherford había conseguido elaborar su modelo del átomo ayudándose con un proyectil de cierta energía: las partículas α. Durante mucho tiempo estas partículas serían el único medio de perturbar de manera controlada el desconocido mundo del microcosmos, con el inconveniente de que para la producción de tales partículas-proyectiles se estaba a merced de elementos que fuesen radiactivos de manera natural. Esta limitación se hizo más notoria cuando Rutherford (1919) abrió otro campo, el de las transformaciones nucleares, al estudiar la reacción $N14+\alpha \rightarrow O17+p$ (esto es, un núcleo de nitrógeno que absorbe una partícula α, transformándose en un núcleo de oxígeno y emitiendo un protón).[178] Las fuentes radiactivas de que se disponía eran demasiado débiles para seguir penetrando en los misterios de los núcleos; un gramo de radio, por ejemplo, producía, aparte de otros productos de desintegración, 37.000 millones de partículas α por segundo, de las cuales una de cada 100.000 producía una transformación; una proporción demasiado escasa como para que se pudiesen separar químicamente las sustancias generadas y examinar así los productos obtenidos. Además, la energía de estas partículas α apenas era suficiente para poder superar la repulsión eléctrica de los núcleos a los que se dirigían. El grupo de Rutherford en el Cavendish descubrió que cuanto más rápidamente viajaban las partículas α, más transformaciones generaban. Por consiguiente, era urgente desarrollar máquinas que aumentasen el número y la velocidad de estas partículas. Y dado que tenían carga, una posible forma de conseguirlo era sometiéndolas a fuertes diferencias de potencial. Pero no solo era urgente, también era imprescindible, porque de lo que se trataba —en este punto se encuentra la verdadera esencia de la física experimental de altas energías— era de producir choques entre partículas para ver qué es lo que «había dentro» y así determinar su estructura. Da fe del éxito de semejante empresa, el que el número de partículas «elementales» no hiciera sino crecer y crecer con la aparición de nuevas máquinas que aceleraban —de ahí el nombre de aceleradores— las partículas.

Hasta el final de la Primera Guerra Mundial, los medios de que se disponía para avanzar en semejante dirección eran escasos. Fue a partir de la década de 1920 cuando comenzaron a aparecer algunos aparatos. Así, en el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie Institution de Washington, Merle Tuve

empleó, hacia 1928, un transformador inventado por Nikola Tesla, con el que alcanzó los 3 millones de voltios. En colaboración con Gregory Breit, Tuve utilizó este método para acelerar protones y electrones. Tras trabajar durante un breve periodo de tiempo en una planta eléctrica en Alabama, Robert J. Van de Graaff diseñó su generador electrostático, y después de permanecer un año en Oxford con una beca, lo adaptó en Princeton (adonde llegó en 1928) para la aceleración de partículas. Pronto su prototipo alcanzó los 80 keV, llegando en 1931 a los 750 kV, y utilizando dos esferas podía conseguir una diferencia de potencial de 1,5 MeV (1 MeV=1.000 keV).[179] En Cambridge (Inglaterra), John D. Cockcroft y Ernest T. S. Walton (1932) utilizaron un multiplicador voltaico que les proporcionó los 500 keV que necesitaron para ser los primeros en observar, en 1932, la desintegración artificial de átomos de litio en dos partículas α. En 1933, Tuve y su grupo utilizaron un generador de Van de Graaff de un millón de voltios junto al tubo de descarga que ellos mismos habían perfeccionado y observaron la desintegración del litio y del boro. En 1937 ya existían generadores de Van de Graaff de cerca de 5 metros de altura, que alcanzaban los 5 millones de voltios. Pero la iniciativa más importante, la que terminaría desarrollándose más y marcando una época de la física, fue la asociada al nombre de Ernest Orlando Lawrence (1901-1958).[180]

Después de graduarse en la universidad de Yale, Lawrence fue contratado como profesor asociado de física por la universidad de Berkeley (California) en 1928. El año siguiente, mientras hojeaba la revista Archiv für Elektrotechnik, se encontró con un artículo del ingeniero noruego Rolf Wideröe (1902-1996), que coincidía casi en su totalidad con su tesis doctoral de 1927 en el Politécnico de Aquisgrán, cuyas ilustraciones (Lawrence sabía poco alemán) le sugirieron la idea del ciclotrón.[181] Lo que Wideröe (1928) había hecho es construir un aparato que le permitía acelerar partículas cargadas (iones de sodio y potasio) a una energía doble que la que correspondería al potencial acelerador utilizado. Colocó en una cámara de vacío un electrodo tubular, conectado en sus extremos a un generador de radiofrecuencia, y situado en la trayectoria de las cargas, que encontraban de ese modo dos vanos en su recorrido. Cuando las cargas atravesaban el primer vano se veían aceleradas por el campo eléctrico y, si la fase de la señal de radiofrecuencia estaba adecuadamente ajustada, cuando estas cargas aceleradas llegaban al segundo vano, encontraban que el campo había invertido el sentido y recibían otra aceleración igual a la primera.

En el trabajo de Wideröe encontramos una de las características de la física experimental de altas energías: su dependencia de ideas y desarrollos

tecnológicos. Al igual que Wideröe, en la historia de esa rama de la física figuran, como nombres destacados, algunos cuyas contribuciones fueron esencialmente tecnológicas.

Lawrence reconoció enseguida el principio de resonancia que sustentaba el trabajo de Wideröe y las posibilidades de extensión de este experimento a energías más elevadas, y tras diversas consideraciones, lo que hizo fue centrarse en las geometrías circulares inicialmente consideradas por el ingeniero noruego, pero con varios avances, uno de ellos la utilización de un campo magnético que permitía que las partículas se moviesen siguiendo trayectorias circulares, de manera que pudiesen atravesar muchas veces el mismo grupo de electrodos, ganando energía cada vez que lo atravesaban; haciendo que el campo eléctrico invirtiera su polaridad cada media vuelta para que el empuje tangencial fuera el adecuado, se conseguía que las partículas fuesen aumentando su energía con cada revolución. Naturalmente, al moverse más deprisa las partículas también describían en cada vuelta círculos más amplios, pero independientemente de lo rápido que se movieran resultaba que siempre tardaban el mismo tiempo en cada revolución, lo que permitía mantener la misma frecuencia de inversión del voltaje, que así siempre estaba en resonancia con los ciclos de la partícula.[182] Este «principio de resonancia» fue en realidad lo que posibilitó la construcción del ciclotrón, un término que, por cierto, Lawrence utilizó durante un tiempo de manera informal (hasta 1936 no se estableció como el nombre oficial), prefiriendo en las notas más formales el de «acelerador de resonancia magnética».

Pero una cosa era la teoría y otra la realidad, y no fue fácil construir un ciclotrón que funcionase. Para semejante tarea, Lawrence contó con la colaboración de sus estudiantes, especialmente con la de Stanley Livingston, que dedicó su investigación doctoral a este fin. A finales de 1930, Lawrence y Livingston completaban la construcción (el coste fue de unos 25 dólares) del primer ciclotrón, que medía unos 12 centímetros de diámetro. El 2 de enero de 1931 lo probaron (aplicando un voltaje de 2.000 voltios), alcanzando con él proyectiles con energías de 80 keV. Enseguida, Lawrence anunció que esperaba poder alcanzar el millón de voltios de energía, e incluso más, si se le facilitaba la construcción de aparatos más elaborados. El presidente de la Universidad reaccionó nombrando catedrático (full professor) a Lawrence. Tenía entonces solo 29 años.

En la primavera de 1931, Lawrence consiguió una beca de 1.000 dólares del

National Research Council. En febrero de 1932, y de nuevo con la ayuda de Livingston, lograba poner en funcionamiento el primer ciclotrón (de poco menos de 30 centímetros de diámetro) que, tal y como había prometido, alcanzaba 1.220.000 voltios, y ello aplicando un voltaje máximo de solo 4.000 voltios (Lawrence y Livingston 1932). Pocas semanas después llegaba la noticia de que en el Cavendish, Cockcroft y Walton (1932) habían conseguido la primera desintegración artificial, para la que habían necesitado únicamente 125.000 voltios, un voltaje que hacía tiempo que estaba al alcance del grupo de Berkeley; la diferencia es que para Lawrence la meta era alcanzar el millón de voltios, no estando todavía interesado en utilizar su máquina con potencias menores. No obstante, Lawrence reaccionó rápidamente y pocos meses después se utilizaba el ciclotrón para observar desintegraciones, publicándose los primeros resultados en octubre de 1932.

El mismo mes y año que entraba en funcionamiento el primer ciclotrón de Berkeley, Harold Urey y sus colaboradores (F. G. Brickwedde y G. M. Murphy) de la Universidad de Columbia, en Nueva York, demostraban la existencia de un isótopo (variedad de un elemento con el mismo número de protones y electrones, pero diferente número de neutrones) del hidrógeno, que era dos veces más pesado que el ordinario, y al que se le llamó deuterio.[183] Este descubrimiento también tuvo repercusiones para el programa de Lawrence, ya que el deuterio, al igual que las partículas α, puede ser utilizado como «desintegrador» nuclear. En marzo de 1933, Gilbert N. Lewis, colega de Lawrence en Berkeley, que disponía del mayor depósito de agua pesada (que contiene gran cantidad de deuterio) del mundo, obtenida de residuos de ácidos de baterías, proporcionó a Lawrence muestras suficientes para producir (mediante un proceso de electrólisis) deuterones (núcleos del deuterio) para su utilización como proyectiles en un nuevo ciclotrón, que estaba planeando ya antes de que funcionase el de 30 centímetros. Este nuevo ciclotrón, de 70 centímetros, entró en funcionamiento en diciembre de 1932 y, al utilizar los deuterones dirigiéndolos hacia un blanco de litio, se encontró que eran diez veces más poderosos como «desintegradores» que los protones (se producían partículas α con una energía superior a cualquiera de las observadas hasta entonces en elementos radiactivos naturales). Para aprovechar todo esto se abrió un amplio programa de investigación basado en los deuterones, que de hecho llevó a que en 1936 —el mismo año en que la Universidad de California creó oficialmente, para Lawrence y sus aparatos, un laboratorio especial, el Radiation Laboratory, como una entidad independiente del Departamento de Física— se modificase el ciclotrón aumentando su tamaño hasta alcanzar casi un metro. Con esta nueva máquina se midió el momento

magnético del neutrón y se produjo, aunque inadvertidamente, el primer elemento artificial, el tecnecio (denominado así para conmemorar el hecho de que fue el primer elemento artificial, esto es, que se necesitó de la ayuda de la «técnica» para producirlo). En efecto, en el verano de 1936, Emilio Segrè, a quien Enrico Fermi había introducido en el mundo de la física del microcosmos y que acababa de ser nombrado catedrático de Física en la Universidad de Palermo, visitó Berkeley. Cuando regresó a Italia llevaba consigo unos trozos de banda de cobre que habían sido bombardeados en el ciclotrón, y que analizó con sus colaboradores. Poco después solicitaba más cobre a Lawrence, señalando que se lo podían mandar por carta. Entre tanto se había abierto el ciclotrón para efectuar algunas reparaciones y Lawrence envió a su colega italiano no solo más cobre, sino también una cinta de molibdeno que tapaba cierta salida, de la que no se esperaba obtener ninguna novedad. Estaban equivocados. Carlo Perrier y Segrè, profesor de mineralogía en Palermo, demostraron que contenía un nuevo elemento, el número 43 de la tabla periódica, el tecnecio, que pasó a ocupar uno de los cuatro lugares todavía vacíos en la tabla. En el artículo en el que presentaban las propiedades radioquímicas del tecnecio, Perrier y Segrè (1937: 716) expresaban su fe en el ciclotrón: «Esperamos también que esta investigación realizada meses después del final de la irradiación y a miles de kilómetros del ciclotrón pueda ayudar a mostrar las tremendas posibilidades de este instrumento». Ciertamente, sus esperanzas se cumplieron: el ciclotrón abrió la senda hacia aceleradores cada vez más grandes y más potentes, con lo que comenzó la denominada Big Science, investigación científica que necesita de grandes recursos, económicos y de personal.[184]

Explicado cómo aparecieron los aceleradores de partículas, pasaré a tratar de un apartado que ayuda a comprender el estatus que la física de altas energías alcanzó en la segunda mitad del siglo XX.

SOCIOPOLÍTICA DE LA FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

Uno de los descubrimientos con más implicaciones sociopolíticas del siglo XX tuvo lugar en Alemania en el otoño de 1938, cuando el químico Otto Hahn, del Instituto de Química de la Kaiser-Wilhelm Gesellschaft (Asociación Káiser Guillermo) situado en Dahlem, en las afueras de Berlín, y su colaborador, el físico Fritz Strassmann, descubrieron que el uranio (estrictamente, el isótopo 235 se rompía, se fisionaba, cuando era bombardeado con neutrones lentos (Hahn y Strassmann 1939). Jamás se había observado algo parecido; las transmutaciones atómicas descubiertas hasta entonces involucraban transformaciones de un elemento a otro cercano a él en la tabla periódica, no ruptura de núcleos en partes comparables. Aquel descubrimiento terminó conduciendo tiempo después, mediante el gran esfuerzo tecnológico-científico que fue el Proyecto Manhattan, a la fabricación de bombas nucleares (o atómicas) por parte de Estados Unidos, que fueron lanzadas sobre Japón. El 6 de agosto de 1945 un bombardero B-29 estadounidense —el ahora famoso Enola Gay— despegaba de la isla de Tinian con una carga mortífera, que lanzó sobre Hiroshima a las 8,15, hora local. Se trataba de Little boy, una bomba atómica de uranio, de unos 4.500 kilogramos de peso y una potencia equivalente a 13.000 toneladas de TNT. Su efecto fue terrible. Virtualmente todo en un radio de 500 metros de la explosión fue incinerado. Los edificios situados hasta 3 kilómetros de distancia, destruidos. Un espeso hongo de humo ascendió hasta 12 kilómetros de altura; a finales de ese año se estimaba el número de víctimas en 145.000 personas. Tres días más tarde (11.02 hora local) le tocó el turno a una bomba de plutonio (otro elemento químico, «fabricado» durante aquellos años, ya que, dada su vida media, hace tiempo que ya no existen depósitos de él en la Tierra), Fat man, como fue nombrada. Pesaba algo más que Little boy, unos 5.000 kilogramos, pero tenía la misma potencia. Su objetivo fue Nagasaki; las víctimas humanas fueron 70.000, menos que en Hiroshima debido a errores en el lanzamiento.

Aquellos lanzamientos, aquellas bombas, pusieron fin a la Segunda Guerra Mundial en el Pacífico. No debe sorprender a nadie que semejante hecho fuese muy apreciado por las Fuerzas Armadas y el Gobierno Federal estadounidenses (y subsidiariamente por cualquier otro país): la física nuclear poseía un gran valor geoestratégico. Y no solo la física nuclear, sino también otras ramas de la física, como la electrónica (recordemos la extrema importancia que tuvo para la

guerra el radar, desarrollado por físicos e ingenieros). La consecuencia fue un aumento extraordinario del dinero destinado por el Gobierno Federal a la investigación científica y tecnológica: el presupuesto de I+D (Investigación y Desarrollo) federal pasó de 74 millones de dólares en 1940 a 1.590 millones en 1945. De hecho, los físicos y autoridades universitarias reconocieron claramente que el esfuerzo bélico iba a producir —lo estaba haciendo ya en realidad— una expansión considerable de los laboratorios y departamentos de física y de ingeniería de sus respectivas universidades, y, consiguientemente, tomaron medidas y adoptaron tácticas encaminadas a sacar el máximo partido de tal situación mucho antes de que se viese próximo el final de la guerra. El distinguido físico John Slater (1975: 217), director del departamento de física del MIT, que tantas contribuciones realizó a la estructura electrónica de átomos y moléculas, expresó muy bien semejantes pensamientos en su autobiografía científica:

Durante la contienda prácticamente todo miembro del Departamento de Física de MIT había estado relacionado, de una manera u otra, con el trabajo para la guerra. Al aproximarse el final de esta, muchos de ellos volvieron a Cambridge [Massachusetts], como hice yo, repletos de nuevos planes para el desarrollo de la física en el Instituto. La guerra había llevado la física a la atención del público, de la industria y del Gobierno, como nunca antes había ocurrido. Era obvio que esto daría como resultado una gran expansión en el interés por la física, de manera análoga a lo que había sucedido con la química durante la Primera Guerra. En particular, el área de la electrónica, ejemplificada por el radar, y el de la estructura nuclear, aplicada a la bomba atómica, estaban encaminadas a llevar a investigaciones y aplicaciones cada vez más intensas, y a números mucho mayores de estudiantes y de oportunidades de empleo. El Instituto había sido un líder en ambos campos antes de la contienda y todo apuntaba a que tomaríamos una posición todavía más prominente después de 1945. Pensábamos entonces que los planes del departamento deberían ser tales que asegurasen esa posición de liderazgo.

Pero lo que nos interesa aquí es la física de altas energías (física nuclear y de partículas elementales), que se vio muy favorecida por la experiencia del Proyecto Manhattan y, luego, por el programa encaminado a la construcción de una bomba de hidrógeno. En particular, la construcción de nuevos aceleradores de partículas resultó especialmente beneficiada.

Lawrence, siempre buscando nuevos recursos para sus laboratorios en Berkeley, recurrió, tras la guerra, al todavía vigente Proyecto Manhattan en busca de ayuda. Su responsable, el general Leslie Groves no puso demasiados reparos para apoyar los planes del científico de California: entre 1945 y 1946, Berkeley recibió del Ejército, para el acelerador linear de partículas de Luis Alvarez y para el sincrotrón (me ocuparé más adelante de esta máquina) de Edwin McMillan, equipos de radar y condensadores valorados en 250.000 y 203.000 dólares, respectivamente. Mientras el Congreso debatía cuál iba a ser el destino de la Atomic Energy Commission, Groves autorizaba 630.000 dólares para construcciones y 1,6 millones para el mantenimiento durante seis meses de los laboratorios de Lawrence.

El que la costa oeste de los Estados Unidos dispusiese en Berkeley de unas instalaciones bien provistas y en expansión, dedicadas a un campo de conocimiento del que se esperaba que acapararía la investigación de punta en el futuro, no fue algo que los físicos y administradores de las universidades de la costa este aceptasen de buen grado. El 16 de enero de 1946 se reunían en la Universidad de Columbia (Nueva York) representantes de 21 instituciones de la región que iba de Filadelfia a New Haven (Universidad de Yale). Fruto de aquella reunión fue una propuesta a Groves para que financiase el establecimiento de un laboratorio colectivo en la costa atlántica. Las noticias de esta iniciativa llegaron inmediatamente a científicos de MIT y de Harvard, en Cambridge, Massachusetts, que se apresuraron a efectuar una propuesta similar. La respuesta de Groves fue clara: no había nada que hablar mientras no se pusiesen de acuerdo ambos grupos. No tardaron mucho estos en satisfacer los deseos del general. En una reunión que tuvo lugar el 16 de febrero se sentaron las bases para el establecimiento de un laboratorio colectivo dedicado a física nuclear y de altas energías: el Brookhaven National Laboratory (BNL), situado en Long Island, Nueva York, que comenzaría a funcionar en enero de 1947, bajo contrato con la Atomic Energy Commission (Comisión de Energía Atómica; AEC), que por entonces acababa de pasar a desempeñar las funciones del Proyecto Manhattan. Es interesante destacar el que diversas instituciones de educación superior uniesen sus esfuerzos (hasta el punto de crear una corporación nueva, Associated Universities, Inc.) para poder competir con Berkeley; de hecho, con la creación del BNL se definía un modelo operativo, basado en la cooperación, que Europa seguiría pocos años después, cuando doce naciones fundaron el Centre Européen de Recherches Nucléaires (CERN), que se ubicaría en Ginebra (Suiza), del que me ocuparé más adelante.

No es difícil entender la racionalidad que subyacía tanto en el establecimiento del BNL como en las ampliaciones del laboratorio de Lawrence, todo financiado, en su inmensa mayoría, con dinero militar. Y es, además, instructivo conocerla. Está claro que aunque en aquellos centros se llevasen a cabo investigaciones de carácter militar, no era esa, o se podía prever que no iba a ser, la principal — o al menos la única — orientación de los laboratorios, especialmente del de Brookhaven. Lo que las Fuerzas Armadas estadounidenses pretendían era controlar una parte sustancial del potencial científico de la nación; mantener de una manera equilibrada, y no demasiado llamativa, una red de instalaciones y personal, científico y técnico, que sirviese a los fines militares; fines que no necesariamente pasaban por involucrar a esos profesionales en investigaciones claramente bélicas, aunque también se hiciese esto, por supuesto. Los militares estadounidenses no cayeron en el error de creer que solamente debían financiar investigaciones encaminadas directamente a producir nuevos armamentos; reconocieron que era necesario mantener de manera permanente relaciones con el mundo académico, ya que si no se corría el riesgo de perder todo lo que laboriosamente se había conseguido durante la guerra, y que para lograr aquello hacía falta una política científica compleja y refinada, que no alienase a los profesionales de la ciencia. Los laboratorios de Berkeley y Brookhaven les permitían, en este sentido, y además de las obvias vinculaciones con la superbomba, sostener complejos equipos de científicos, ingenieros y técnicos, trabajando en problemas que involucraban la física nuclear, la electrónica, la física del estado sólido, la ciencia de los materiales, la matemática aplicada y los ordenadores; equipos de científicos que podrían, por ejemplo, ser incorporados instantáneamente a nuevos proyectos eminentemente bélicos, no necesariamente del tipo del Proyecto Manhattan. No hubo, por consiguiente, ni ingenuidad ni improvisación en el apoyo que las Fuerzas Armadas prestaron a partir de 1945 a la ciencia.[185] Y un nuevo acontecimiento político daría aún más fuerza a los físicos nucleares.

El 3 de septiembre de 1949, en una de las muestras tomadas por uno de los aviones B-29 que la Fuerza Aérea estadounidense utilizaba para analizar el aire sobre Japón, Alaska y el Polo Norte, se encontraron evidencias de que sobre el Pacífico Norte, cerca de Japón, se había producido la primera explosión nuclear soviética. Había tenido lugar el 29 de agosto. Este hecho significó el comienzo real de la carrera atómica. En Estados Unidos, Ernest Lawrence y Edward Teller defendieron la idea de que había que contraatacar desarrollando una nueva arma que pudiese contrarrestar la de los soviéticos; fabricar una superbomba, mucho más poderosa que las de 1945, una bomba de hidrógeno, esto es, de fusión, que

utilizase procesos similares a las reacciones termonucleares que tienen lugar en el interior de las estrellas, en las que partiendo de elementos ligeros se producen otros más pesados, emitiendo al mismo tiempo gran cantidad de energía.[186] Aunque la idea de tal bomba se remontaba a los primeros tiempos del proyecto atómico durante la guerra, no se había avanzado en su desarrollo al no establecerse un programa adecuado.[187]

Aunque en 1949 la comunidad científica norteamericana no estaba tan unida como diez años antes, produciéndose una clara división de puntos de vista (Oppenheimer se opuso a la nueva bomba, mientras que Lawrence y Edward Teller desarrollaron una intensa campaña en favor de ella) finalmente el 31 de enero de 1950 el presidente Truman aprobaba la propuesta. Dos años y nueve meses después, Estados Unidos hacía explotar una bomba (Mike) 1.000 veces más potente que las de 1945.[188] Tres años y pocas semanas después, los soviéticos hacían estallar una equivalente, en Asia central.

La decisión de fabricar la bomba de hidrógeno implicó nuevos recursos para la física nuclear y de altas energías, una situación que continuó durante las décadas siguientes, en las que fue la física subnuclear, la de partículas elementales-altas energías, la que se erigió pronto en dominante, ante la interesante pero más limitada física nuclear.

NUEVOS ACELERADORES, NUEVOS ELEMENTOS, NUEVAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Como ya he señalado, los ciclotrones de Lawrence fueron muy importantes para el nacimiento de la física de altas energías, pero tenían problemas. Uno de ellos era el de mantener con precisión la sincronía en el paso de la partícula acelerada con el empuje electromagnético que estas recibían en cada paso; el ya citado «principio de resonancia». La solución a este problema fue el apropiadamente denominado «sincrotrón». Veamos cómo se refirió a este desarrollo Stanley Livingston (1969: 39):

El principio de aceleración sincrónica o estabilidad de fase, que fue introducido en 1945, cambió el curso de la historia de los aceleradores y abrió un nuevo campo de investigación científica, el de la física de partículas. El principio de estabilidad de fase fue descubierto simultáneamente en dos países. A comienzos de 1945, V. Veksler en la Unión Soviética, publicó un artículo en el que presentaba el principio. Y más tarde, pero también en 1945, antes de que el artículo de Veksler llegase a Estados Unidos, E. M. McMillan [1945], de la Universidad de California anunció el mismo principio. Ambos artículos presentaban métodos mediante los cuales las partículas en aceleradores del tipo resonancia podrían ser mantenidas indefinidamente en resonancia con campos de radiofrecuencia, dando lugar a aceleradores de energías mucho más elevadas.

Justo el año en que terminó la Segunda Guerra Mundial, comenzaba, como señalaba Livingston, una nueva era en la historia de los aceleradores de partículas, y por consiguiente también en la historia de la física de altas energías. El que los responsables fueran dos científicos de los dos países cuyas políticas condicionarían en lo sucesivo una parte clave de la historia mundial, es significativo: la investigación científica formó parte relevante de sus políticas, y en consecuencia ambas naciones lideraron extensas áreas de la ciencia mundial.

Edwin McMillan, uno de los dos introductores del principio de estabilidad de fase, formaba parte del grupo de Lawrence en Berkeley. Fue allí, en 1940 (antes,

por tanto, de que Estados Unidos entrase en la Segunda Guerra Mundial), cuando, junto a Philip Abelson y utilizando el ciclotrón, obtuvo el neptunio: hicieron que el isótopo 239 del uranio absorbiese un neutrón, que subsiguientemente experimentó una desintegración β, dando lugar al neptunio (McMillan y Abelson 1940). Por ese trabajo, McMillan recibió el Premio Nobel de Química de 1951, que compartió con Glenn T. Seaborg, otro miembro del grupo de Berkeley y principal responsable del descubrimiento de diez elementos químicos transuránicos (esto es, elementos cuyo número atómico es superior al del uranio, que es de 92): plutonio, americio, curio, berkelio, californio, einstenio, fermio, mendelevio, nobelio y el elemento 106, que en su honor fue bautizado con el nombre de seaborgio. Dentro del nuevo Zeitgeist («espíritu del tiempo»), en el que afluía dinero con generosidad para la física de altas energías, McMillan recibió medio millón de dólares de las Fuerzas Armadas para construir un sincrotrón de electrones de 300 MeV (1MeV =106 eV), energía que, una vez completada la máquina, alcanzó en 1949. Poco antes, en 1948, la AEC, que tenía el monopolio de todos los asuntos relacionados con la energía nuclear, aprobó la financiación necesaria para construir dos grandes aceleradores, un sincrotrón de 3 GeV (3·109 eV) para protones en el Brookhaven National Laboratory (Long Island, Nueva York), denominado Cosmotrón, y otro de 6 GeV en Berkeley, más tarde denominado Bevatrón (estos nombres aludían a Cosmic rays, rayos cósmicos, y a billion electron volts, billones, americanos, de electrón-voltios).

La energía del Bevatrón se escogió porque con ella se podrían producir antiprotones (es decir, una partícula con la misma masa que el protón, pero con carga opuesta), si es que tales partículas existían. Se esperaba que apareciesen en reacciones en las que dos protones interaccionasen dando lugar a tres protones más un antiprotón. Varios grupos intentaron identificar de esta manera el antiprotón, pero fue el grupo que desde 1936 dirigía Emilio Segrè, desde 1936 en Berkeley, quien lo consiguió finalmente en 1955. El experimento que realizaron comenzó en agosto de 1955; el 21 de septiembre obtuvieron la primera evidencia de antiprotones. Basándose en 60 sucesos, el grupo envió una carta a Physical Review que apareció a finales de octubre. «Uno de los rasgos destacados de la teoría del electrón de Dirac», comenzaban su carta al editor (Chamberlain, Segrè, Wiegand y Ypsilantis 1955), «fue la aparición de soluciones de sus ecuaciones que requerían la existencia de una antipartícula, más tarde identificada como el positrón. La extensión de la teoría de Dirac al protón exige la existencia de un antiprotón, una partícula que mantiene con el protón la misma relación que el positrón con el electrón. Sin embargo, hasta que

se obtuvo prueba experimental de la existencia del antiprotón, se podía cuestionar si el protón es una partícula de Dirac en el mismo sentido que lo es el electrón. Por ejemplo, el momento magnético anómalo del protón indica que la ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa del protón. En consecuencia, la demostración experimental de la existencia del antiprotón fue uno de los objetivos considerados cuando se planeó el Bevatrón».

Además de reforzar la idea de la antimateria —todas las partículas tienen una, aunque pueda ser ella misma, como en el caso del fotón— el hallazgo experimental del antiprotón constituyó uno de los primeros ejemplos de un proceso que se repetiría muchas otras veces a lo largo de la segunda mitad del siglo: el descubrimiento de partículas «elementales» previstas por la teoría.

De hecho, un año después del descubrimiento del antiprotón, otro grupo de Berkeley (Cork, Lamberston, Piccioni y Wenzel 1956) detectó el antineutrón, algo que era más difícil ya que el neutrón no posee carga eléctrica y por tanto no deja rastros como los de otras partículas.[189] Se pudo identificar en reacciones en las que chocaban un protón y un antiprotón, dando lugar a un par neutrón-antineutrón (en principio, es cierto, parecería que el choque entre un protón y su antipartícula, el antiprotón, debería dar lugar a que se aniquilasen ambos con emisión de energía, pero si el antiprotón tiene suficiente energía, no se produce necesariamente esa aniquilación, transfiriéndose la carga negativa del antiprotón al protón, con el resultado de que ambas partículas se hacen neutras, separándose).

Pero conviene volver ahora al otro introductor del principio de estabilidad de fase, al ruso Vladimir Veksler, que había comenzado su carrera como ingeniero eléctrico, trabajando en rayos X, pero en 1936 se unió al Instituto Lebedev de Moscú para investigar en rayos cósmicos, interesándose después en aceleradores. En 1946, el Instituto Lebedev ya contaba con un sincrotrón de electrones de 30 MeV (el principio de estabilidad tuvo importantes aplicaciones en cinco tipos de aceleradores: sincrotrones de electrones, sincrociclotrones, sincrotrones de protones, microtrones y aceleradores lineales).[190] Más tarde, Veksler encabezó el laboratorio de física de altas energías en el Instituto de Investigación Nuclear de Dubna, el «laboratorio internacional para las naciones socialistas», dirigiendo la construcción de un sincrotrón de protones (denominado sincrofasotrón) de 10 GeV, que se terminó en 1957, siendo durante algunos años el acelerador que alcanzaba mayores energías. Este hecho, el que en la Unión Soviética existiese un acelerador que alcanzaba energías no

igualadas en Estados Unidos, tuvo consecuencias que merece la pena explicar, porque muestran la interrelación que existía entre física de altas energías y política.

Poco tiempo después de que Dwight David Eisenhower llegase a la presidencia de Estados Unidos en 1953, tuvo noticia de que la Unión Soviética estaba construyendo un gran acelerador en el centro de física de altas energías de Dubna. En mayo de 1956 una delegación estadounidense viajó por primera vez a ese instituto y comprobó que la noticia era cierta. Uno de los miembros de la delegación informaba a su regreso que la máquina de Dubna, de un diámetro de 200 metros, constituía «una visión deslumbrante. Es casi el doble de grande que la máquina de Berkeley [...] el coste y los presupuestos no importan. Preguntamos varias veces al profesor Veksler, que dirige la construcción, el coste total de la máquina. Se encogió de hombros y dijo que no sabía. Veksler declaró: «Se decidió construir la máquina y entonces todo lo que se necesite para ella se tendrá» (Greenberg 1999: 217). Otro de los científicos de la delegación, el distinguido físico, antiguo miembro del laboratorio de Los Álamos y catedrático en la Universidad de Rochester, Robert E. Marshak, manifestó:

Parece que la investigación científica en la Unión Soviética se desarrolla con una urgencia que recuerda las operaciones de guerra. Mientras mis colegas y yo visitábamos los laboratorios de investigación nuclear de la URSS el pasado mayo, advertimos la misma dedicación personal a la tarea, el mismo énfasis en velocidad independiente del coste, el mismo apoyo financiero ilimitado para instalaciones y equipo, que nosotros mismos conocimos en Los Álamos durante la Segunda Guerra Mundial.

Es evidente que el programa de investigación científica de la URSS está experimentando un progreso enorme y que el objetivo es superar a la ciencia americana en su gran diversidad y alta calidad.

Que la Unión Soviética estuviese superando a Estados Unidos en ciencia era algo que los norteamericanos no podían aceptar; había una nueva guerra, que no se libraba en los campos de batalla tradicionales sino en los laboratorios, y Estados Unidos no se podía permitir ser derrotado. Cuando el año siguiente,

1957, entró en funcionamiento el acelerador para protones de Dubna y, además, se lanzó el Sputnik, quedó claro que, efectivamente, una guerra científica estaba en curso y que, al menos en ciertas áreas estratégicas, Estados Unidos no la lideraba.

Es en este contexto desde el que se debe entender el proceso que condujo a la construcción de un nuevo acelerador estadounidense, un acelerador lineal de electrones de tres kilómetros y medio: el Stanford Lineal Accelerator Center (SLAC).[191]

Estrictamente, los orígenes de SLAC tienen que ver con apartados diferentes. En primer lugar, con el hecho de que algunos físicos optasen por aceleradores lineales en vez de circulares, con el argumento de que en estos las partículas perdían por radiación grandes cantidades de energía al seguir órbitas circulares, y que por consiguiente en uno lineal sería probablemente más fácil alcanzar energías más altas. Siguiendo tal razonamiento, físicos de la Universidad de Stanford construyeron a mediados de la década de 1950 cuatro aceleradores lineales con la ayuda de la Office of Naval Research, una agencia naval que se distinguió en aquellos años en la promoción de la investigación científica.

Estimulados por los resultados que estaban obteniendo con estos aceleradores lineales, un grupo de físicos de Stanford formado por miembros del Laboratorio de Física de Altas Energías y del Laboratorio de Microondas, y liderado por Edward L. Ginzton y Wolfgang K. H. Panofsky, tuvieron la idea de construir un nuevo acelerador lineal que pudiese llegar a energías mucho más altas. En abril de 1957, este grupo presentó un extenso (100 páginas) informe técnico, simultáneamente, al Departamento de Defensa, a la National Science Foundation y a la AEC. El coste estimado del proyecto era de 78 millones de dólares para la construcción, además de 14 millones anuales para gastos de operación y mantenimiento. Después de ser objeto de numerosas evaluaciones por un panel constituido con este único fin, nombrado por el Comité Asesor General (General Advisory Committee) de la Comisión de Energía Atómica y por el PSAC, el 14 de mayo de 1959, durante un simposio sobre investigación básica celebrado en Nueva York, Eisenhower anunciaba que siguiendo las recomendaciones de sus asesores había decidido pedir al Congreso que dedicase 100 millones de dólares para construir en la Universidad de Stanford el mayor instrumento científico de la historia. Con un año de demora, en 1961 el Congreso autorizó, finalmente, el proyecto. La construcción se inició en 1962 y los primeros haces de partículas se generaron en 1966. En su momento fue el mayor acelerador existente en el

mundo —alcanzaba una energía de 20 GeV— y continuó siéndolo hasta la construcción de un sincrotrón para acelerar protones y antiprotones en un nuevo centro, el National Accelerator Laboratory, conocido después como Fermi National Accelerator Laboratory (o Fermilab), cerca de Batavia (Illinois). Completado en 1983, y bautizado Tevatrón, el primer haz, de 512 GeV, se logró el 3 de julio. En febrero del año siguiente se llegaba a los 800 GeV. El perímetro de su anillo medía 6,86 kilómetros y dependía de la Universidad de Chicago, el Instituto de Tecnología de Illinois y la Universities Research Association.[192]

Pero en la construcción del SLAC, también se encuentra un trasfondo político, pero ahora con otra dimensión, más «interna», la propia de la universidad y el ejemplo que aportó la política llevada a cabo en ella.[193] El mismo Panofsky, cuya influencia en la política científica estadounidense se haría sentir durante décadas (especial pero no únicamente en el campo de la física de altas energías), se refirió a este punto cuando escribió (Panofsky 1992: 131): «SLAC no representó una repentina transición a la gran ciencia, sino un paso en el esquema evolutivo que se inició en Stanford durante la guerra de Corea. En aquel momento el Provost [vicepresidente ejecutivo] de Stanford, Frederick Terman, tomó, de acuerdo con varios miembros de la facultad, incluyendo varios del departamento de física, una decisión deliberada: que la universidad debería aumentar su relación con las actividades científicas y técnicas apoyadas por el Gobierno. Una razón primordial para hacer esto entonces era el miedo a que durante la Guerra de Corea los miembros de la facultad técnica abandonaran Stanford, siguiendo el esquema que había tenido lugar durante la Segunda Guerra Mundial».

Asimismo, y como era de esperar — es algo que sucede habitualmente en relación a los grandes proyectos científicos—, la historia de SLAC muestra otros apartados, más «mundanos», «subterráneos», de la empresa científica, en los que, lo quisieran o no, el gobierno federal, esto es el presidente Eisenhower y sus asesores científicos, también tuvieron que involucrarse. Un magnífico instrumento para percibir esta dimensión mundana de la ciencia, y dentro de ella las dificultades con las que debió encontrarse el presidente para formarse una opinión, son los diarios que llevó el químico de origen ucraniano, instalado en Estados Unidos desde 1928, George B. Kistiakowsky, mientras fue el principal asesor de Eisenhower para ciencia y tecnología, desde su puesto de director del Comité Asesor del Presidente para Ciencia (President’s Science Advisory Committee; PSAC), que ocupaba desde 1959.

En la entrada correspondiente al 6 de enero de 1960 —esto es, después del anuncio oficial de Eisenhower— Kistiakowsky (1976: 217-218) escribía: «Estuve alrededor de una hora solo con Panofsky [...] Pasamos después al otro penoso tema —el acelerador lineal de Stanford, que él está apoyando— y supe, para mi sorpresa, que todo este asunto de una máquina productora de neutrones [se trataba de una nueva propuesta] y de las cartas de físicos a la AEC urgiendo su construcción en preferencia al acelerador de Stanford, es una maniobra de Rabi, que se opone en principio a las máquinas de altas energías, y que en consecuencia ha intentado bloquear el acelerador de Stanford. ¡Será bastardo! ¡Me pilló! Panofsky dijo que Serber, Lee y otros están ahora muy disgustados por haber escrito y que Rabi les ha engañado. Por supuesto, el daño ya está hecho y con estas cartas en las manos de McCone, que obviamente no quiere que el acelerador de Stanford vaya adelante, poco se puede hacer».

Los citados Robert Serber y Tsung-Dao Lee eran catedráticos de Física en la Universidad de Columbia, mientras que John A. McCone fue chairman de la AEC entre 1958 y 1961, año en que pasó a dirigir la CIA (Central Intelligence Agency). En cuanto a Rabi, quien ya nos apareció en el capítulo primero, la cita anterior no es sino un ejemplo más, entre muchos posibles, de cuán activo fue este magnífico físico (Premio Nobel de Física en 1944) en el ámbito de la política científica. Pronto veremos otro ejemplo. De hecho, el caso de Rabi —al igual que el de otros, como Teller— muestra con claridad la emergencia de un nuevo tipo de científico; uno que luchaba no solo en la arena científica para hacer avanzar su ciencia, sino también en la política, buscando el poder que nunca podría alcanzar desde su despacho o laboratorio. Quería ese poder no solo para que la ciencia continuase avanzando, sino también porque como ciudadano tenía sus propias ideas políticas, en las que la ciencia desempeñaba un papel destacado, y pretendía que tales ideas se impusiesen a otras. Entre esa avanzadilla de científicos pioneros en el escenario de la política, abundaron los veteranos de Los Álamos y de otros grandes programas de investigación militar que se desarrollaron durante la Segunda Guerra Mundial (como el del radar), que estuvieron mejor entrenados que la mayoría de sus colegas en las complejas artes de las maniobras y las negociaciones políticas.

Pero regresemos a los diarios de Kistiakowsky. Dos meses después de la cita anterior, el 9 de marzo, Kistiakowsky (1976: 264-265) anotaba en otra entrada de su diario:

9.30-11.00 a.m. Reunión con el general Persons, McCone, Stans y Goodpaster sobre el Programa de Aceleradores de Partículas de Altas Energías. Primero tuvo lugar una larga e indecisa discusión acerca de lo que sucedió realmente el 2 de abril de 1959, cuando McCone, Goodpaster, Persons, Killian y Staats hablaron con el Presidente sobre el acelerador de Stanford.[194] El memorándum que preparó Goodpaster sobre la reunión no coincide con el de McCone y ninguno está de acuerdo con lo que recuerdan las personas implicadas. Parece que se advirtió al Presidente de la necesidad de otras adiciones al programa de construcción de aceleradores más allá del acelerador de Stanford y que no se le suministraron cifras precisas de costos, aunque se mencionaron algunos números mucho más pequeños que los que ahora se consideran. Parece también que el Presidente únicamente autorizó el acelerador de Stanford. McCone estuvo bastante evasivo en cuanto a comprometerse con el programa. Pasó mucho tiempo explicando a Persons las razones del retraso en el acelerador de Stanford, mientras que Persons leyó una nota manuscrita del Presidente que preguntaba por qué no se había tomado ninguna acción en el acelerador de Stanford, que él había pedido en abril de 1959. Persons sugirió que lo que la gente implicada debía hacer era trabajar y asegurarse que el acelerador de Stanford continuase avanzando. A continuación tratamos acerca de la relación de este proyecto con otros, haciendo hincapié en que algunos físicos dan a estos una mayor prioridad. Stans dejó bien claro que era impropio de los científicos vender un programa al Presidente asegurando que costaría tantos dólares y un año después ir y decir que los costos se habían multiplicado varias veces, y urgió que no se recomendasen al Congreso ni el acelerador de Stanford ni otros proyectos.[195] En esto estuvo muy firme. Tomé la palabra abruptamente señalando que este programa implicaba el prestigio nacional en competición con la Unión Soviética y que presentaba una oportunidad única de demostrar fortaleza en lugar de debilidad.

Mi último ejemplo es la entrada del 23 de marzo del mismo año 1960 (Kistiakowsky 1976: 280):

9.30-10.30 a.m. Con el Presidente, Persons, McCone y Stans sobre el programa de aceleradores de partículas. McCone dio una confusa y pobremente organizada presentación, una buena parte de ella dedicada a justificar sus propios retrasos con respecto al acelerador de Stanford. El resultado fue que el Presidente

desarrolló una actitud ligeramente negativa sobre SLAC; por consiguiente hablé en términos generales sobre las razones para que el Gobierno apoye la ciencia y cómo debemos... seleccionar también ciertas áreas para apoyarlas vigorosa y decididamente. Identifiqué la física de altas energías como una de ellas. Esto pareció influir en el Presidente y habló con mucho énfasis sobre sacar adelante el proyecto de Stanford, incluso de manera acelerada. Entonces criticó a la AEC por haber comenzado demasiados aceleradores, sugiriendo que a los científicos no les debería importar viajar para usar otras de estas grandes máquinas. Aunque no fue muy explícito, McCone y yo sacamos la impresión de que autorizaba el resto del programa, pero que quería extender el presupuesto a lo largo de varios años fiscales; esta fue ciertamente la impresión que extrajo Stans porque cuando salimos del despacho los tres estuvimos de acuerdo en que debería darse mayor prioridad al bevatrón de Berkeley [el bevatrón comenzó a operar en 1954] que a la máquina de Princeton-Penn. El día siguiente telefoneó McCone enojadísimo, diciendo que Stans mantiene ahora que el Presidente no aprobó nada salvo el acelerador de Stanford y que Goodpaster parece estar de acuerdo con él.

No he tenido oportunidad de mencionarlo hasta ahora, pero es importante recordar otro importante avance, que ayudó mucho al funcionamiento de aceleradores como los que nos han ido apareciendo. Se trata de un problema que afectaba seriamente a los grandes sincrotrones: el de que las órbitas tendían a desviarse de su trayectoria, produciendo lo que metafóricamente podría denominarse «aberración cromática», esto es una desviación del haz. Este problema se eliminó gracias a un método introducido en 1952 (Courant, Livingston y Snyder 1952): el Alternative-Gradient (AG) Focussing («Enfoque de Gradiente alternativo»), o simplemente Strong Focussing («Enfoque fuerte»).[196]

Podría continuar con la historia de los aceleradores de partículas, pero no es necesario para los propósitos del presente libro, salvo en lo que se refiere a un laboratorio que nació al otro lado del Atlántico, en la vieja Europa: el Centre Européen de Recherches Nucleaires (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares).[197]

EL CERN

Brevemente expuesto, los pasos en el camino que conduciría al establecimiento del CERN fueron los siguientes: a finales de 1949 varias personas relacionadas con los asuntos nucleares en Europa comenzaron a pensar seriamente en las posibilidades de una cooperación multinacional en el área. Las iniciativas más importantes provinieron de Raoult Dautry, administrador general del Comisariado de Energía Atómica francés. En la Conferencia Cultural Europea celebrada en Suiza en diciembre de 1949, se pasó una resolución que recomendaba que se procediera a estudiar la posibilidad de crear un instituto europeo para la ciencia nuclear, «dirigido hacia las aplicaciones en la vida diaria». Seis meses después el físico de la Universidad de Columbia, Isidor Rabi, presentaba una resolución en la Quinta Asamblea General de UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), celebrada en Florencia, invitando a la creación de laboratorios europeos, incluyendo uno de física nuclear (también mencionó la biología molecular). La propuesta fue adoptada por la Asamblea General de UNESCO el 7 de junio de 1950.

Es interesante señalar el que parece ser fue el principal motivo de la iniciativa de Rabi. «Yo quería», declaró a su biógrafo (Ridgen 1987: 236), «hacer lo que pudiese para reforzar Europa, por hacer que se sostuviese por sí misma industrial y psicológicamente, al igual que de otros modos. No veía ninguna razón para que nosotros [Estados Unidos] luchásemos contra los rusos — todavía pienso lo mismo— excepto por Europa. Si Europa fuese independiente y tuviese un sentido de unidad, podríamos ser amigables con los rusos y considerarlos como un pueblo curioso que trata de vivir bajo esa divertida forma de gobierno. Podríamos sentir simpatía por ellos por su falta de libertad. Pero con Europa allí, existía un problema».

Su iniciativa en favor de organizaciones científicas europeas, debería, por tanto, servir para fomentar el «sentido de unidad» de que, en su opinión, carecía Europa. Solo así, podrían estabilizarse las relaciones entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Este, y no otro, era el principal objetivo de Rabi.

Aunque los científicos también tuvieron que ver con los movimientos a favor de una organización de investigación nuclear europea, se puede decir que hasta la

asamblea de Florencia las iniciativas provenían más de medios socioculturales que de medios científicos. Sin embargo, esta situación cambiaría rápidamente. Las sugerencias de Rabi fueron tomadas seriamente y desarrolladas en los meses siguientes por dos grupos de científicos: uno estaba formado por un puñado de especialistas en física nuclear, como Lew Kowarski, de Francia, un antiguo colaborador de Frédéric Joliot-Curie, y Peter Preisswerk, de Suiza, y el otro por expertos en rayos cósmicos, entre los que sobresalían el italiano Edoardo Amaldi y el francés Pierre Auger. También habría que mencionar al ya citado Dautry, a Gustavo Colonnetti, presidente del Consiglio Nazionale della Ricerca italiano, y a Jean Willems, director de Fonds National de la Recherche Scientifique belga. En diciembre de 1950 se celebró la primera reunión de científicos y administradores dedicada explícitamente al tema; organizada por Auger (que era también director del Departamento de Ciencias Exactas y Naturales de UNESCO), condujo a la propuesta de que se articulase la forma de que en Europa se construyese el mayor acelerador de partículas del mundo.

A lo largo del año siguiente Auger dirigió los trabajos encaminados a perfeccionar el proyecto, celebrándose en diciembre de 1951 una conferencia intergubernamental bajo los auspicios de UNESCO, organismo que, de hecho, terminó patrocinando el proyecto. Finalmente, se decidió la creación de una organización temporal, un CERN provisional, que debería dar paso a la institución definitiva. En febrero de 1952 once naciones acordaban financiar el proyecto: Bélgica, Dinamarca, Francia, Grecia, Italia, Holanda, Noruega, República Federal Alemana, Suecia, Suiza y Yugoslavia (Reino Unido no firmó este acuerdo, pero sí el Convenio definitivo, Austria se unió en julio de 1959 y España en enero de 1961).[198] En octubre el Consejo provisional de delegados aceptó que la pieza central del laboratorio fuese un sincrotrón de alrededor de 30 GeV y que este se construyese en Ginebra. En junio de 1953 el Consejo había elaborado el texto del Convenio definitivo, que entraría en vigor el 29 de septiembre de 1954, cuando se reunió por primera vez el Consejo de lo que podríamos denominar el CERN permanente.[199]

Cuando se repasa la historia de los primeros tiempos de existencia del CERN se detectan detalles cuya explicación es significativa. Así, aunque tanto los científicos franceses como los británicos señalaban a sus gobiernos desde comienzos de 1952 que el convertirse en miembros del CERN provisional no representaba ninguna obligación con relación a participar en la construcción de los aceleradores, la dirección (el Consejo) del CERN, dominada por físicos, tomó una serie de iniciativas que restringían considerablemente la libertad de

maniobra futura de sus gobiernos; por ejemplo, decidiendo comenzar la construcción de la sede central (se inició el 17 de mayo de 1954) cuatro meses antes de que se ratificase la Convención. Si el Consejo del CERN tuvo la libertad necesaria para proceder como lo hizo, para imponer su poder científico al político, fue por diferentes motivos, en los que intereses generales se mezclan con particulares (nacionales). Por un lado, los promotores de la organización se aprovecharon del mito nuclear, de las ansiedades producidas por el comienzo de la Guerra Fría y por el deseo de reconstruir Europa. Pero también es cierto que estos argumentos no afectaban por igual a todas las naciones involucradas; explicar la génesis del CERN significa, de hecho, efectuar un delicado ejercicio en el que ciencia, política y diplomacia se combinan. Por ejemplo, hay que tomar en consideración los intereses de naciones concretas, como Alemania, para quien formar parte del CERN significaba una manera de evitar la prohibición que le habían impuesto los aliados de investigar en física nuclear. Por otro lado, para Gran Bretaña las motivaciones europeístas no eran importantes (de hecho, se rechazaban, como cuando en abril de 1953 el Foreign Office manifestó que el Reino Unido «debería ser capaz de demostrar al mundo que la Organización no tiene de hecho significado político como un cuerpo europeo», declaración en la que se adivina el deseo de no perjudicar sus relaciones bilaterales con Estados Unidos); para los británicos, la justificación principal al unirse al CERN era la de poder acceder a un acelerador de entre 25 y 30 GeV. Para Suiza, que gracias a su neutralidad fue elegida para albergar conferencias decisivas en las iniciativas europeístas de la época, resultaba enormemente atractivo el hecho de que Ginebra fuese elegida para sede central del CERN. Esta ubicación también resultaba agradable para Francia, que al tener el laboratorio al lado de sus fronteras, podía aspirar a mantener una influencia cultural importante en la organización.

Por otra parte, estaba la dimensión diplomática paneuropeísta, cuya importancia se puede ver en el hecho de que el Consejo del CERN pudo, sin problemas, establecer a mediados de 1953 una Convención que, visto retrospectivamente, era bastante extraña: no se establecían cuotas nacionales en la contratación de personal (en la práctica solo se dieron rivalidades nacionales para los puestos de dirección), ni se intentó establecer una correlación entre el valor de los contratos industriales con el nivel de contribución de las diferentes naciones al presupuesto del CERN (esta política se mantuvo hasta los años 70) y, por último, no existía derecho a veto en el Consejo, ni siquiera en los votos para aprobar el presupuesto: las decisiones se tomaban por mayoría, y en asuntos particularmente espinosos, excepcionales, por una mayoría de dos tercios.

El fruto de todo fue, y continúa siendo, un centro de investigación en cuyos aceleradores y departamentos teóricos se han llevado a cabo avances de primer orden en física de altas energías, adelantándose en ocasiones a los físicos estadounidenses. El CERN, aunque ciertamente oneroso, situó a Europa en un lugar de élite en una rama de la ciencia que se significó especialmente a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, mostrando un posible camino para una ciencia de élite hecha en Europa.[200]

Con respecto a los aceleradores del CERN, el primero —se puso en marcha en agosto de 1957— fue un sincrociclotrón (SC), por el que circulaba un haz de protones. Diseñado en 1952, antes incluso de que el CERN dispusiera de instalaciones propias, alcanzaba los 600 MeV de energía, y no aportó ninguna innovación técnica importante, sirviendo sobre todo para que físicos europeos adquiriesen experiencia.[201] Muy diferente fue el Sincrotrón de Protones (PS), que aceleró protones por primera vez a una energía de 24 GeV el 24 de noviembre de 1959 (la decisión de construirlo se había tomado siete años antes). Fue el acelerador más potente del mundo hasta que entró en funcionamiento el AGS (Alternating Gradient Syncrotron) de Brookhaven. En la década de 1970, se aumentó la intensidad del haz del PS y se reconstruyeron algunos de sus subsistemas. En 1971, el Consejo del CERN aprobó una idea que databa de una década antes: la construcción de un Súper Sincrotrón de Protones (SPS), un acelerador de 7 kilómetros de circunferencia, subterráneo (estaba excavado a 40 metros de profundidad y atravesaba la frontera entre Suiza y Francia; fue el primer acelerador transnacional) que debía estar cerca del PS pues este serviría como inyector de haces de protones. Comenzó a operar en 1976 y en él se descubrieron en 1983 los bosones W+, W- y Z que predecía la teoría electrodébil de Weinberg-Salam-Glashow (me ocuparé de ella más adelante).

En junio de 1980 se dio un nuevo paso en la carrera hacia aceleradores más potentes, al presentar el proyecto de un Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP), una máquina de 50 GeV de energía por haz, con una circunferencia de 27 kilómetros, que utilizaría el PS y el SPS como aceleradores previos. El proyecto se aprobó y el LEP entró en funcionamiento en 1990. El último de los grandes aceleradores del CERN ha sido el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), con el que se encontró, medio siglo después de haber sido predicho teóricamente, el bosón de Higgs, descubrimiento que se anunció públicamente el 4 de julio de 2012.

La mención del LHC me da pie a comentar un episodio importante de la historia

de la física de altas energías: el del nonato Súper Colisionador Superconductor (Superconducting Super Collider; SSC), donde, de haberse construido, seguramente se habría encontrado el bosón de Higgs. Y ¿por qué no se construyó?

El SSC respondía a un proyecto de los físicos de altas energías estadounidenses, propuesto en 1983, que lo estimaban indispensable para continuar desarrollando la estructura del denominado modelo estándar. Iba a estar formado por un túnel de 87 kilómetros de longitud que debería ser excavado en las proximidades de una pequeña población de 18.000 habitantes, situada a 30 kilómetros al sudoeste de Dallas, en Waxahachie (Texas). En el interior de ese túnel miles de bobinas magnéticas superconductoras guiarían dos haces de protones para que, después de millones de vueltas, alcanzasen una energía veinte veces más alta que la que se podía conseguir en los aceleradores existentes. En varios puntos a lo largo del anillo, los protones de los dos haces chocarían, y enormes detectores controlarían lo que sucediera en tales colisiones. El coste del proyecto, que llevaría diez años, se estimó inicialmente en 6.000 millones de dólares.

Después de una azarosa vida, con la excavación del túnel ya realizada, después de una prolongada, difícil y cambiante discusión parlamentaria, tanto en el Congreso como en el Senado, el 19 de octubre de 1993 el Congreso canceló el proyecto. Otros programas científicos —especialmente en el campo de las ciencias biomédicas— atraían la atención de los congresistas y senadores norteamericanos, y también, ¿cómo negarlo?, de la sociedad, más interesada en asuntos que la atañen directamente, como la salud.

Aquella decisión representó un cambio notable con respecto a la tendencia dominante desde el final de la Segunda Guerra Mundial. Todavía a finales de la década de 1950 los físicos de altas energías podían insistir, sin demasiados problemas, en la idea de la centralidad de su especialidad, como se comprueba a través de un informe hecho público por la Casa Blanca en mayo de 1959. El informe, que llevaba por título, Un manifiesto explicativo sobre la física de partículas elementales y un Programa Federal propuesto para apoyar la física de aceleradores de alta energía, había sido preparado, a instancias de la Comisión de Energía Atómica y del Comité Asesor del Presidente para Asuntos Científicos, por un pequeño grupo de científicos entre los que se encontraban Hans Bethe y Edwin McMillan. En él se pueden leer frases como las siguientes (Schweber 1994: 151): «La física de partículas elementales [...] se ocupa de fenómenos muy apartados de nuestros entornos inmediatos y familiares [...] y

procede no con vista hacia aplicaciones útiles, sino hacia el descubrimiento por sí mismo [...] Constituye el corazón de la física moderna, y es el producto de muchos siglos de esfuerzos por comprender el Universo». Sentadas estas bases, el comité recomendaba la construcción de un acelerador lineal de electrones en Stanford, que se continuase apoyando (financiando) en los planes de la Asociación para la Investigación de las Universidades del Medio-oeste para la construcción de un acelerador, al igual que la posibilidad de construir otro en Oak Ridge, uno de los centros que, como sabemos, estuvieron asociados al Proyecto Manhattan. Más concretamente, el panel de científicos recomendaba que se aumentase el nivel de financiación del Gobierno para investigación en física de partículas elementales.

Pero, por entonces, la situación había comenzado a cambiar. Con el comienzo de la Guerra Fría (y el lanzamiento del Sputnik) se potenció la idea de «hacer del mundo un lugar seguro para la democracia», un propósito que requería grandes inversiones para el desarrollo y fabricación de nuevas armas. Y solo una economía en expansión constante podría sostener semejante esfuerzo. Por esta vía comenzó la ciencia aplicada, la innovación tecnológica, a desbancar, en el mundo de la política, la idea de que sería de la ciencia practicada por sí misma, por su propio avance, de donde vendrían todas las soluciones. En 1968, la enmienda Daddario-Kennedy modificó la National Science Foundation en forma y en concepto, autorizando que financiase investigación aplicada al igual que básica.[202] También hay que tener en cuenta que a comienzos de la década de 1960 habían empezado a aparecer limitaciones en el presupuesto. El mayor número de científicos que habían producido las filosofías precedentes, la magnitud creciente del coste de la ciencia experimental, y los efectos de la fundación de la NASA (en particular el establecimiento en 1961 del programa Apollo para que un hombre pisase la Luna) y de los Institutos Nacionales de la Salud (recordemos que en 1971 el presidente Nixon lanzó su propio «programa Apollo», solo que en su caso el objetivo era vencer el cáncer) hicieron patente que había que imponer algún criterio en la asignación de recursos.

Este nuevo contexto hizo que la justificación tradicional de la física de altas energías tuviera que ser modificada. Los físicos de altas energías se vieron obligados a recurrir más a argumentos racionales, en lugar de a razones de prestigio —cuando no a presiones políticas— para defender su pretensión de continuar ocupando en el listado del presupuesto uno de los lugares más altos. Tales argumentos consistían (y continúan consistiendo) habitualmente en exposiciones de los beneficios económicos que surgirían de sus investigaciones.

El fracaso del proyecto del SSC hay que entenderlo desde esta perspectiva y antecedentes. Por supuesto, y como cabía esperar, muchos físicos de altas energías se manifestaron públicamente en desacuerdo con la decisión tomada. Entre ellos, Steven Weinberg. Es interesante analizar algunos de los comentarios efectuados por Weinberg en su libro El sueño de una teoría final (1992), cuyo origen debe mucho a su deseo de dar la mayor publicidad posible a sus ideas en este tema.

Según Weinberg (1994: 220-221), los «problemas del proyecto del Súper Colisionador han sido en parte un efecto colateral de cambios políticos ajenos a él. El presidente Clinton ha mantenido el apoyo de la administración al SSC, pero él se jugaba menos, políticamente, en ello que lo que se habían jugado el presidente Bush de Texas o el presidente Reagan, durante cuya administración se inició el proyecto. Lo que es quizá más importante, muchos miembros del Congreso (especialmente los nuevos) sienten ahora que es necesario demostrar su prudencia fiscal votando contra algo. El Súper Colisionador representa un 0,043 por ciento del presupuesto federal, pero se ha convertido en un símbolo político conveniente». «Durante siglos», escribía en otro lugar de su libro (Weinberg 1994: 222-223), «las relaciones entre ciencia y sociedad han estado gobernadas por un pacto tácito. Generalmente los científicos quieren hacer descubrimientos que sean universales o bellos o fundamentales, ya puedan preverse o no beneficios concretos para la sociedad. Algunas personas que no son científicos encuentran excitante este tipo de ciencia pura, pero la sociedad [...] ha estado generalmente dispuesta a apoyar el trabajo en ciencia pura principalmente porque espera que tenga aplicaciones, ya sea a la tecnología o a la medicina o a la guerra. Generalmente estas expectativas se han mostrado correctas [...] Pero ahora este pacto parece estar en entredicho. No se trata solamente de que algunos miembros del Congreso hayan perdido su confianza en la ciencia pura; la batalla por los fondos ha llevado a algunos de los propios científicos, que trabajan en campos aplicados, a volverse contra el apoyo a aquellos de nosotros que buscamos leyes de la naturaleza. Y los problemas a los que se ha enfrentado el Súper Colisionador en el Congreso son simplemente un síntoma de este desencanto de la ciencia pura».

Utilizar la expresión «desencanto», una palabra polivalente cuando no equívoca, puede inducir a error. La acepción que más fácilmente viene a la mente es la de abandonar una empresa recomendable, si no admirable. Pero tras la decisión de abandonar la construcción del SSC hay mucho más de lo que Weinberg indica, o sutilmente sugiere. Existen otras cuestiones, actuaciones o hechos que es

conveniente comentar para comprender realmente lo sucedido.[203]

Un primer punto a explorar es el que el propio Weinberg mencionaba cuando casi de pasada escribía: «pero él [el presidente Clinton] se jugaba políticamente menos en ello de lo que se habían jugado el presidente Bush de Texas o el presidente Reagan, durante cuya administración se inició el proyecto».[204] Comencemos por señalar que el proyecto del SSC fue favorecido por Reagan porque encajaba adecuadamente con su megaprograma militar denominado «Iniciativa de Defensa Estratégica», popularmente conocido como «Guerra de las Galaxias». Pero si los posibles retornos tecnológicos — insistentemente prometidos por los defensores del proyectado acelerador — podían ser atractivos para el presidente y su administración, otro elemento atrajo inmediatamente la atención de aquellos: el Colisionador debería crear una gran cantidad de nuevos puestos de trabajo, entre cinco y ocho mil. No es sorprendente, por consiguiente, que la mitad de los Estados de la Unión entrase en la competición —iniciada el 1 de abril de 1987— por la elección del lugar en el que debía instalarse. El 10 de noviembre de 1988, esto es, el día después de que George Bush fuese elegido presidente, el secretario de Energía, John Herrington, anunciaba que el SSC sería construido en Waxahachie. El estado de Texas proporcionaría 200 millas cuadradas de terreno y mil millones de dólares para el proyecto. Sin embargo, algunos observadores no dejaron de señalar que el presidente electo llamaba Texas su hogar y que la delegación tejana en el Congreso incluía al speaker de la Cámara, Jim Wright, y a los senadores Lloyd Bentsen, que acababa de participar en la competición electoral como candidato demócrata a la vicepresidencia, y Phil Gramm, representante de Waxahachie.

También es posible comprender mejor en la frase de Weinberg, el «se jugaba menos políticamente», si se tienen en cuenta otros hechos, además de los que acabo de señalar. Hechos como que, cuando los entusiasmos iniciales en favor del SSC comenzaron a decaer (entre otros motivos porque en 1989 se introdujeron cambios en el diseño del acelerador que elevaron su presupuesto a 8.249 millones de dólares, y porque el Gobierno Federal parecía incapaz de cumplir la promesa realizada por Reagan y Bush al Congreso de que un tercio del coste provendría de fuentes no federales), algunos de los apoyos más importantes para el SSC llegaron de personas cuyas motivaciones políticas resultaban evidentes. Apoyos como el del congresista republicano archiconservador, Joe Barton, representante de Waxahachie, a quien no le importó, en un contradictorio ejercicio de lógica, defender, por un lado, el proyecto del SSC, y por otro, en 1992, la necesidad de enmendar la propia

Constitución para asegurar presupuestos equilibrados, actitud que llevó al congresista demócrata de Florida y enemigo del SSC, Lawrence J. Smith, a referirse a Barton como «obviamente un contorsionista, que está al mismo tiempo en dos lados opuestos de la política fiscal» (Kevles 1997: 285). Otro defensor del SSC, cuyas motivaciones eran transparentes e ilustrativas, fue el senador por Louisiana, J. Bennett Johnston, que encabezaba el Comité de Energía y Recursos Naturales del Senado, al igual que el Subcomité de Adjudicaciones para Energía y Desarrollo del Agua. Johnston había sido al principio un oponente al SSC, pero se convirtió en un gran defensor suyo cuando General Dynamics se comprometió a producir los imanes superconductores que necesitaba el acelerador, en su factoría de Hammond, en Louisiana.

Si hay ejemplos transparentes de la relación entre ciencia y política, entre ciencia y sociedad, este es uno de ellos. Y a todo lo anterior hay que añadir otros aspectos muy importantes, como el cambio de sensibilidad pública, más interesada por cuestiones medioambientales y la aparición en escena de un campo científico enormemente fecundo y mucho más próximo a los ciudadanos, como el de la biología molecular y las ciencias biomédicas relacionadas con ella.

PARTÍCULAS Y MÁS PARTÍCULAS: LOS QUARKS COMO «PRINCIPIO UNIFICADOR»

Con aceleradores tan poderosos como los anteriormente descritos —y muchos otros que no he mencionado— el número de partículas descubiertas fue aumentando progresivamente. Intentar enumerar aquí cómo fue creciendo esa lista (ya he mencionado los ejemplos de los bosones W+, W- , Z y el de Higgs, junto a unos pocos más que aparecerán más adelante)[205] y componer un cuadro medianamente completo de las partículas subatómicas que se han ido detectando a partir de la década de 1950 está fuera de los objetivos de este libro. Sí quiero señalar que en esta historia teoría y experimentación anduvieron de la mano: en, probablemente, la mayoría de los casos, los físicos teóricos predecían la existencia de una partícula hasta entonces no observada y era función de los físicos experimentales de altas energías buscarla, lo que a veces implicaba construir nuevos aceleradores más potentes, o adecuar los existentes para la tarea. Por otra parte, las teorías de que se disponía no permitían encajar todas, o parte, de las partículas encontradas o que se suponía existían, lo que dio lugar a una rama de la física de altas energías muy activa, centrada en modelos y cálculos que permitiesen diferenciar modelos, así como las consecuencias experimentales de estos, y medir parámetros asociados a las partículas: es la denominada fenomenología de física de partículas.

Se puede obtener una idea de cómo fue creciendo el número de partículas recurriendo a lo que dijo Enrico Fermi en la Conferencia Internacional de Física Nuclear y la Física de Partículas Fundamentales, celebrada en Chicago en 1951. En su intervención enumeraba las 21 «partículas fundamentales» que entonces se creía existían (Fermi 1965 b: 825): electrón, positrón, protón, antiprotón, neutrón, antineutrón, fotón, pión positivo, pión negativo, pión neutro, muón negativo, muón positivo, gravitón, V+, V-, V0, mesón τ+, mesón τ-, mesón κ+, mesón κ- y neutrino. Según las notas tomadas de su conferencia, Fermi (1965 b: 826) había manifestado: «Filosóficamente, al menos algunas de estas 21 partículas deben estar lejos de ser elementales. El requisito para que una partícula sea elemental es que no posea estructura. Probablemente alguna de estas 21 partículas no sean objetos sin estructura. Incluso pueden tener alguna estructura geométrica, si la geometría tiene algún sentido en un dominio tan pequeño. Las partículas fundamentales se distinguen más fácilmente por la

carga, la masa y el espín».[206]

En realidad, esta distinción ya la había propuesto Fermi en un artículo que escribió en colaboración con el físico chino-americano Chen Ning Yang (n. 1922), que se titulaba «¿Son los mesones partículas elementales?» y que comenzaba con las siguientes frases (Fermi y Yang 1949: 1739):

En los últimos años, se han descubierto diversas partículas que actualmente se consideran «elementales»; esto es, básicamente sin estructura. La probabilidad de que todas esas partículas sean realmente elementales se hace cada vez menor según va creciendo su número.

No es en absoluto cierto que nucleones, mesones, electrones, neutrinos sean todos partículas elementales y podría ser que, al menos, algunos de los fallos de las teorías actuales se deban a que no se considere la posibilidad de que algunas de ellas puedan tener una estructura compleja. Desgraciadamente, no poseemos ninguna prueba para decidir si esto es cierto, mucho menos para decidir qué partículas son simples y cuáles complejas.

Y en su artículo se dedicaban a estudiar la hipótesis de que el mesón π pudiera no ser elemental, sino una partícula compuesta formada por la asociación de un nucleón (esto es, un protón o un neutrón) y un anti-nucleón.

El paso dado por Fermi y Yang fue continuado por Shoichi Sakata (1956), del Instituto de Física Teórica de la Universidad de Nagoya, para incluir unas nuevas partículas, denominadas extrañas, como los kaones (K) e hiperones (Λ0, Σ0, Σ+, Σ-, Ξ0, Ξ-), que aparecían con cierta facilidad en colisiones de partículas (en, por ejemplo, reacciones como $p + \pi^- \rightarrow \Lambda^0 + K^0$, o $p + \pi^- \rightarrow \Sigma^- + K^+$) y para las que, independientemente, Tadao Nakano y Kazuhiko Nishijima (1953), de la Universidad de Kioto, y Murray Gell-Mann (1953) habían introducido un nuevo número cuántico, denominado extrañeza, S, que, como se terminaría comprobando, se conserva en las interacciones fuerte y electromagnética, pero no en la débil.

Un nuevo, y muy importante, mojón en aquella carrera de obstáculos fue el modelo que clasificaba los hadrones (partículas a las que les afecta la interacción

fuerte) en familias, basándose en un principio que más tarde se denominó «Eightfold way», y que propusieron independientemente (una circunstancia esta que, como estamos viendo, se repitió con cierta frecuencia, y que se debe entender como manifestación de lo activo, y trasnacional, que era el campo de investigación de la física de altas energías) Gell-Mann (1961, 1962) y el físico israelí Yuvai Ne'eman (1961), entonces en el Departamento de Física del Imperial College de Londres.[207] Ambos se dieron cuenta de que los mesones (hadrones con espín entero) y que parte de los bariones (hadrones pesados con espín semientero) se podían agrupar de forma natural en octetes, mientras que los bariones de espín -3/2 lo harían en decupletes, formando triángulos con diez elementos.[208]

Matemáticamente, el Eightfold way se podía representar en tres dimensiones, una propiedad que condujo en 1964, de nuevo independientemente, a Murray Gell-Mann y George Zweig (que se había doctorado con Feynman en Caltech, pero que entonces se encontraba en el CERN) a proponer la idea de los quarks (aces en la terminología de Zweig, finalmente abandonada).[209]

Hasta su aparición en el complejo y variado mundo de las partículas elementales, se pensaba que protones y neutrones eran estructuras atómicas inquebrantables, realmente básicas, y que la carga eléctrica asociada a protones y electrones era una unidad indivisible. Los quarks no obedecían a esta regla, ya que se les asignó cargas fraccionarias. De acuerdo a Gell-Mann (1964) y Zweig (1964), los hadrones están formados por dos o tres especies de quarks y antiquarks, denominados u (up, arriba), d (down, abajo) y s (strange, extraño), con, respectivamente, cargas eléctricas 2/3, -1/3 y -1/3 la carga del electrón. Así, un protón está formado por dos quarks u y uno d, mientras que un neutrón está formado por dos quarks d y por otro u; son, por consiguiente, estructuras compuestas. Posteriormente, otros físicos propusieron la existencia de tres nuevos quarks: charm (c, 1974), bottom (b, 1977) y top (t, 1995). Para caracterizar esta variedad, se dice que los quarks tienen seis tipos de «sabores» (flavours); además, cada uno de estos seis tipos puede ser de tres clases, o colores: rojo, amarillo (o verde) y azul. Y para cada quark existe, claro, un antiquark.

Por supuesto, nombres como los anteriores —color, sabor, arriba, abajo...— no representan la realidad que asociamos normalmente a tales conceptos, aunque puede en algún caso existir una cierta lógica en ellos, como sucede con el color. Veamos lo que el propio Gell-Mann (1995: 199) manifestó con respecto a este

término:[210]

Aunque el término «color» es más que nada un nombre gracioso, sirve también como metáfora. Hay tres colores, denominados rojo, verde y azul a semejanza de los tres colores básicos en una teoría simple de la visión humana del color (en el caso de la pintura, los tres colores primarios suelen ser el rojo, el amarillo y el azul, pero para mezclar luces en lugar de pigmentos, el amarillo se sustituye por el verde). La receta para un neutrón o un protón consiste en tomar un quark de cada color, es decir, uno rojo, uno verde y uno azul, de modo que la suma de colores se anule. Como en la visión del color blanco se puede considerar una mezcla de rojo, verde y azul, podemos decir metafóricamente que el neutrón y el protón son blancos.

En definitiva, los quarks tienen color pero los hadrones no: son blancos. La idea es que solo las partículas blancas son observables directamente en la naturaleza, mientras que los quarks no; ellos están «confinados», asociados formando hadrones. Nunca podremos observar un quark libre. Ahora bien, para que los quarks permanezcan confinados deben existir fuerzas entre ellos muy diferentes de las electromagnéticas o de las restantes. «Así como la fuerza electromagnética entre electrones está mediada por el intercambio virtual de fotones», utilizando de nuevo a Gell-Mann (1995: 200), «los quarks están ligados entre sí por una fuerza que surge del intercambio de otros cuantos: los gluones (del inglés glue, pegamento), llamados así porque hacen que los quarks se peguen formando objetos observables blancos como el protón y el neutrón». Pruebas de la existencia de los gluones se encontraron en DESY, el centro alemán de física experimental de altas energías, al interpretar los decaimientos hadrónicos en términos de tres gluones (Berger et al. 1979).

A finales de la década de 1960, el SLAC de Stanford pudo producir electrones con la suficiente energía como para mostrar — fue una colaboración Stanford-MIT — la estructura interna de los protones. Se partía de la idea de que si la carga del protón estuviera distribuida de manera uniforme entonces los electrones los atravesarían sin experimentar desviaciones apreciables, mientras que si la distribución estuviese concentrada en estructuras internas, esto es, en los quarks, entonces un electrón que pasase cerca de uno de ellos se desviaría

más que otro que no pasara tan cerca. Los experimentos en SLAC mostraron tales desviaciones. No obstante, por entonces, la idea de los quarks aún no se había asentado suficientemente, de manera que muchos físicos (incluyendo Gell-Mann y Zweig) dudaban de su realidad física. Feynman (1969), colega de Gell-Mann en Caltech, y director de tesis de Zweig, se interesó por los resultados de SLAC, pero los interpretó no en términos de quarks, sino de unas entidades que, de hecho, había imaginado un poco antes, partones (porque eran partes de los hadrones). Con no excesiva rapidez, la terminología de los partones fue abandonada en favor de los quarks. Para que sucediera esto, ayudó mucho el desarrollo de la teoría de los quarks, en el que desempeñaron un papel destacado Harald Fritzsch, del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica de Múnich, y Gell-Mann, en un trabajo que completaron mientras ambos estaban en el CERN (Fritzsch y Gell-Mann 1972), en el que asentaron, con más firmeza que otros, las bases de lo que se terminaría denominando cromodinámica cuántica, que explica por qué los quarks están confinados tan fuertemente que nunca pueden escapar de las estructuras hadrónicas que forman. Por supuesto, el nombre cromodinámica —procedente del término griego cromos (color)— aludía al color de los quarks, y el adjetivo «cuántica» a que es compatible con los requisitos cuánticos. Al ser la cromodinámica cuántica una teoría de las partículas elementales con color, y al estar este asociado a los quarks, que a su vez tratan de los hadrones —las partículas sujetas a la interacción fuerte—, tenemos que la cromodinámica cuántica describe esta interacción.

Cuando se lee el artículo de Fritzsch y Gell-Mann (1972) se encuentra, al comienzo de la sección II («Quarks y gluones ficticios y sus estadísticas»), la siguiente manifestación: «Aquí suponemos que los quarks no tienen contrapartidas reales que se puedan detectar aisladamente en el laboratorio; se supone que están permanentemente ligados en el interior de mesones y bariones». Aludían a la propiedad de la fuerza que los une, lo que se denominó confinamiento, o libertad asintótica. Fueron David Gross y Frank Wilczek (1973), junto con (pero independientemente) David Politzer (1973), quienes la introdujeron con una base teórica firme:[211] cuánto más cerca están dos quarks, menor es la fuerza entre ellos, y, recíprocamente, según se van alejando, aumenta esa fuerza, circunstancia esta que explica el que no se observen libres.

EL DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRINO

Hasta ahora he hecho hincapié en los aceleradores como el instrumento para detectar partículas (eso sí, después de que se encontrasen las primeras partículas elementales, protón, electrón, neutrón, positrón), pero existen excepciones: además de las ya citadas, la más notable es el neutrino, la partícula que, como vimos en el capítulo primero, habían propuesto Pauli y Fermi incorporándola a su teoría de la desintegración β. Se trata de una partícula extremadamente elusiva: Pauli había supuesto que debía tener una masa muy pequeña, o incluso cero, posibilidad esta que finalmente se aceptó (más adelante veremos que erróneamente). Obviamente, esto hacía muy difícil detectarlo, pero era necesario hacerlo porque hasta entonces no era sino una hipótesis teórica introducida para explicar dos fenómenos. Pero solo se podía detectarlo si interaccionaba con alguna otra partícula, lejos del lugar y momento en el que se había producido en la desintegración β. Y este era un problema verdaderamente grave: cálculos basados en la teoría de la desintegración β de Fermi, realizados por Bethe y Peierls (1934), indicaban que la sección eficaz (un parámetro físico que representa la capacidad de interacción de una partícula) para un neutrino con una energía de 2,3 MeV era extremadamente pequeña, menor que 10-44 cm2/núcleo, lo que significaba que podría atravesar 1014 kilómetros de materia sin interaccionar con ningún átomo. Esto les llevaba a concluir que «es absolutamente imposible observar procesos de este tipo con los neutrinos creados en transformaciones nucleares».

El principal responsable de mostrar que aquella predicción era errónea fue Frederick Reines (1918-1998). El aspecto esencial en el que se basó, o, mejor, aprovechó, es que aunque la sección eficaz calculada por Bethe y Peierls era correcta, en fenómenos físicos en los que se produjese un número comparablemente elevado de neutrinos —como una explosión nuclear, algo en lo que no podían pensar Bethe y Peierls en 1934— podría esperarse detectar alguno.

Al igual que otros físicos destacados, Reines trabajó en la División Teórica de Los Álamos, el centro del Proyecto Manhattan, dirigido por Robert Oppenheimer, encargado de reunir los materiales necesarios para fabricar bombas atómicas y hacer que estas funcionasen. Años después, en un congreso

internacional sobre la historia de la física de partículas celebrado en París, en julio de 1982, Reines (1982) explicó cómo llegó a descubrir neutrinos libres. Seguiré su descripción:[212] «Desde la primera explosión de una bomba nuclear en Nuevo México en el verano de 1945, me interesé en la física, y las consecuencias, de los fenómenos no habituales que caracterizaban a semejante explosión. Además de la evidente onda expansiva, radiación térmica, rayos gamma y neutrones, se pensaba que las explosiones nucleares producían un, relativamente breve e intenso, pulso de neutrinos». Sin embargo, por entonces, Reines no pensó demasiado en los neutrinos. Al término de la guerra, Reines continuó trabajando en Los Álamos, y fue allí, en 1951, después de las pruebas nucleares realizadas en el atolón Eniwetok, en el Pacífico, cuando decidió «buscar un problema de física que, al contrario que los desarrollos de armamentos, fuese de naturaleza más fundamental, uno en el que pudiese dejar mi sello». Para ello solicitó permiso a su jefe en Los Álamos para dedicarse algún tiempo solo a pensar. Este se lo concedió. «Fue un periodo muy difícil. Los meses pasaban y todo lo que pude extraer del subconsciente fue la posible utilidad de aquellas bombas para detectar neutrinos de manera directa.» Afortunadamente, Fermi visitó Los Álamos aquel verano y Reines le comentó su idea. «Recuerdo que la conversación transcurrió de la manera siguiente: “He estado pensando sobre cómo detectar neutrinos, y pienso que la bomba es la mejor fuente”. Fermi reflexionó un minuto y dijo un sí que a mí me pareció un tal vez. Entonces dije que me parecía que se necesitaría un detector con una masa de alrededor de una tonelada. Él estuvo de acuerdo. Luego dije que no tenía idea de cómo construir tal detector. Él concedió que tampoco sabía cómo y con aquello terminó la conversación.»

Algunos meses después, Clyde Cowan, que también trabajaba en el centro de Los Álamos, se unió al proyecto de Reines. Se centraron en la reacción inversa a la desintegración β

$$\nu^- + p \rightarrow n + e^+$$

(antineutrino interaccionado con un protón produce un neutrón más un positrón).

En el otoño de 1952 se dieron cuenta de que podrían utilizar un reactor nuclear,

en lugar de una bomba, como fuente de neutrinos. «Recuerdo», explicaba Reines, «una conversación con H. A. Bethe en la que me preguntó cómo pensábamos distinguir un suceso producido por un neutrino de otras señales asociadas a la bomba. Le expliqué cómo, además de utilizar un blindaje que detuviese los rayos gamma y los neutrones, podríamos usar la coincidencia retardada ente el positrón y el neutrón producidos, para identificar la interacción del neutrino. No fue hasta muchos meses después cuando Cowan y yo nos dimos cuenta de que este procedimiento podría reducir drásticamente el fondo de señales, de manera que, en lugar de una bomba, podríamos ser capaces de utilizar como fuente la fisión continua que se produce en un reactor». El 4 de octubre de 1952, Reines escribía a Fermi informándole de la novedad (Cronin, ed. 2004: 91):

Querido Enrico,

Pensamos que podías estar interesado en la última versión de nuestro experimento para detectar el neutrino libre, de ahí esta carta. Como recordarás, planeamos utilizar una explosión nuclear como fuente por problemas de fondo. Hasta la semana pasada no se nos ocurrió que el problema del fondo de señales podría reducirse hasta el punto de que el reactor de Hanford fuese suficiente para contar únicamente coincidencias retardadas entre el pulso del positrón y el pulso de captura del neutrón.

Y, aunque aún quedaba mucho por hacer, aquella idea condujo a que el neutrino fuera finalmente identificado. Como se indicaba en la carta a Fermi, el lugar elegido para los experimentos fue la central nuclear de Hanford (Hanford Engineer Works), situada en las orillas del río Columbia, en el estado de Washington, construida durante la Segunda Guerra Mundial.

Reines y Cowan decidieron utilizar una técnica nueva de detección de los productos de esa reacción inversa, un contador de centelleo con un líquido mezcla de compuestos orgánicos y una pequeña cantidad de sales de cadmio. Este detector también desempeñaría el papel de blanco, al contener protones. Los antineutrinos interaccionando con los protones producirían positrones muy energéticos y neutrones (que serían capturados por el cadmio). La primera señal

que se observaría sería la de los rayos gamma que resultan de la aniquilación del positrón, centelleos detectados por los fotomultiplicadores convenientemente instalados, y entre 1 a 9 microsegundos más tarde se observaría otra señal de rayos gamma muy energéticos debidos a la captura del neutrón por el cadmio.

Desgraciadamente, los experimentos que realizaron no fueron todo lo exitoso que pensaban, debido al fuerte «ruido» de fondo de los rayos cósmicos y a las señales eléctricas que se producían en el reactor (y que terminaron identificando como debidas a un ascensor que movía las barras de uranio que alimentaban el reactor). Aun así, detectaron posibles señales, que Reines y Cowan (1953 b) reseñaron en un documento datado el 6 de agosto de 1953 y que inicialmente fue clasificado como reservado, aunque esta calificación fue levantada enseguida (el 24 del mismo mes), y todo ello a pesar de que el mismo escrito había sido enviado el 9 de julio a Physical Review, donde se publicó (Reines y Cowan 1953 c). Con anterioridad, en febrero de 1953, habían enviado a Physical Review una carta en la que esbozaban el experimento que se proponían realizar (Reines y Cowan 1953 a).

Estimulados con los resultados, y con la ayuda de varios grupos de Los Álamos, se dedicaron a mejorar el detector, eligiendo para las nuevas pruebas un reactor nuclear nuevo y más poderoso (producía 700 megavatios de potencia en la época), la planta nuclear de la central del río Savannah (Savannah River Plant) que, además, era particularmente adecuada para esa investigación, dado su pequeño tamaño y el hecho de disponer de un lugar blindado a 11 metros del centro del reactor y a unos 12 metros de profundidad en donde poder colocar el detector que construyeron (este estaba compuesto por tres tanques llenos de líquido susceptible de producir centelleos al paso de los neutrinos, cada tanque con 110 fotomultiplicadores).[213] Y así, finalmente, se detectó el neutrino en 1956 (Cowan, Reines, Harrison, Kruse y McGuire 1956). Enseguida, el 14 de junio, Reines y Cowan enviaron un telegrama a Pauli, a Zúrich: «Estamos felices de informarle», escribieron, «que definitivamente hemos detectado neutrinos procedentes de fragmentos de fisión, observando la desintegración β inversa de protones. La sección eficaz observada coincide bien con el esperado seis veces diez elevado a menos cuarenta y cuatro centímetros cuadrados» (reproducido en Reines 1982: 249). Pauli contestó rápidamente: «Gracias por el mensaje. Todo le llega al que sabe esperar».

En 1995, la Academia Sueca de Ciencias decidió otorgar el Premio Nobel de Física a Reines, por este logro. Fallecido en 1974, Cowan no tuvo oportunidad

de recibir su parte. En cualquier caso, la iniciativa y los continuados esfuerzos que Reines dedicó al estudio del neutrino a lo largo de su vida, le hicieron merecedor del galardón en solitario.

Pero la física de neutrinos todavía guardaba novedades. Y, una importante, es que ¡tienen masa! Para llegar a este resultado fue necesario recurrir no a los neutrinos procedentes de reactores nucleares, cuya energía es demasiado pequeña, sino a los de energía más elevada —y que por tanto interaccionan más fácilmente con la materia— que llegan a la Tierra desde el Sol, donde se originan en reacciones nucleares.

El primer nombre que hay que citar en lo que constituiría una larga y penosa investigación, es el de Raymond Davis, que se había doctorado en Química-física por la Universidad de Yale. Incorporado en 1948 al Brookhaven National Laboratory, a partir de 1951, Davis se dedicó a la tarea de intentar detectar, no a medir su masa, neutrinos utilizando para ello una reacción que había señalado Bruno Pontecorvo:[214]

$$\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow {}^{37}Ar + e^-,$$

donde ve representa la variedad de neutrino electrónico, Cl37 el isótopo 37 de cloro, Ar37 el isótopo 37 del argón y e- el electrón.[215] Había, por consiguiente, que disponer de un tanque con suficiente cloro y argón. Esto es lo que hizo Davis, guiado también por el modelo teórico de producción de neutrinos en el Sol desarrollado por John N. Bahcall. Así, en 1964, se publicaron en Physical Review dos artículos: uno de Bahcall (1964), en el que describía su modelo, y otro de Davis (1964), con la propuesta del procedimiento experimental que pretendía seguir. Cuatro años después, Davies disponía del detector, un gran tanque lleno de 390 m3 de C_2Cl_4, instalado en la mina de oro Homestake, en Lead (Dakota del Sur). Pero su experimento no proporcionó resultados positivos: el flujo que midieron no coincidía con lo que predecía el modelo de Bahcall. La discrepancia la explicaron Vladimir Gribov y Pontecorvo (1969), basándose en la existencia de unas «oscilaciones de neutrinos» —idea introducida por Pontecorvo (1957)—, que implicaba una disminución del flujo y que el neutrino tuviese masa, pero nuevos experimentos realizados

posteriormente tampoco resolvieron las discrepancias. Y aquí nos aparece el japonés Masatoshi Koshiba, un físico con gran experiencia que había estudiado en Kioto, doctorándose en 1955 en la Universidad de Rochester con una tesis sobre rayos cósmicos, y trabajado en Chicago hasta 1963, cuando se instaló en Tokio. Gracias a una nueva técnica experimental ideada por Koshiba y utilizando un gigantesco detector de 50.000 m3 provisto de 11.000 fotomultiplicadores, el Super-Kamiokande detector de neutrinos, el grupo que él lideraba (Fukuda et al. 1998) determinó, casi treinta años después de los experimentos de Davis, que los neutrinos tienen masa. Como vemos, este resultado fue consecuencia de la interacción activa entre la búsqueda experimental de neutrinos y los desarrollos teóricos.

En 2002, Raymond Davis y Masatoshi Koshiba compartieron la mitad del Premio Nobel de Física, «por sus contribuciones pioneras a la astrofísica, en particular a la detección de neutrinos cósmicos». La otra mitad fue a parar a Riccardo Giacconi «por sus pioneras contribuciones a la astrofísica que han conducido al descubrimiento de fuentes de rayos X cósmicos».

LA SAGA DE LAS SIMETRÍAS: «LA SIMETRÍA DICTA LA INTERACCIÓN»

Una gran parte de lo que he estado exponiendo al considerar el desarrollo de la física teórica de altas energías — como, por ejemplo, el caso del Eightfold way —, está directamente relacionado con las simetrías, con la suposición de que las partículas subatómicas se agrupan obedeciendo a determinados principios de simetría, entendiendo por «simetría» la invariancia de «algo», de un sistema, bajo una transformación. La idea de simetría constituye uno de los grandes principios unificadores de la física; representa la unificación que subyace en los fenómenos físicos, un faro luminoso que guía las búsquedas en las que están empeñados los físicos. Aunque se trata de una idea que siempre ha estado presente en el desarrollo de la ciencia, solo a partir del siglo XIX se introdujo con rigor en la matemática, y luego, a comienzos del siglo XX, en la física. Sobre el papel que la simetría ha desempeñado en la física, citaré lo que señaló uno de los principales defensores de la simetría en la física cuántica, Eugene Wigner (1964, 14):

Sin duda, consideraciones de simetría e invariancia, e incluso leyes de conservación, desempeñaron un importante papel en el pensamiento de los primeros físicos, como Galileo y Newton, y probablemente incluso antes que ellos. Sin embargo, no se pensaba que estas consideraciones fueran particularmente importantes y rara vez se explicitaban. Las ecuaciones de Newton no se formulaban en ningún sistema de coordenadas especial y por tanto dejaban que todas las direcciones y todos los puntos del espacio fuesen equivalentes. Como ahora diríamos, eran invariantes bajo rotaciones y traslaciones. Lo mismo se aplicaba para su ley de gravitación. No merecía la pena hacer hincapié en este hecho, y en pensar en la posibilidad de leyes de la naturaleza que mostrasen una simetría menor. En lo que se refiere a las leyes de conservación, la ley de la energía era útil e, instintivamente, fue reconocida en la mecánica incluso antes de Galileo. Tomados en su total generalidad, los teoremas de conservación del momento y del momento angular no eran muy útiles incluso en el caso especial del movimiento central en el que conducen, por supuesto, a una de las leyes de Kepler. La mayoría de los libros sobre mecánica,

escritos en el paso del siglo XIX al XX, e incluso más tarde, no mencionan el teorema general de la conservación del momento angular. Debe haber sido conocido por bastantes, porque aquellos que se ocupaban del problema de tres cuerpos, donde es muy útil, lo escribían como algo sabido. Sin embargo, la gente no le prestaba mucha atención.

En lo que se refiere a la evolución de la idea de simetría en la matemática, debemos recordar los trabajos, ya mencionados en el capítulo segundo, de Sophus Lie y de Felix Klein; de este en particular su, también citado, «Programa de Erlangen».

En el capítulo segundo no mencioné, y ahora es conveniente hacerlo, que el problema en el que se centró Lie fue el de aplicar la teoría de grupos al estudio de ecuaciones diferenciales, que involucran magnitudes continuas (funciones), a diferencia de Évariste Galois, quien lo había hecho con las ecuaciones algebraicas. Más concretamente, Lie se planteó si existía para las ecuaciones diferenciales alguna teoría análoga a la que había desarrollado Galois para las ecuaciones algebraicas. La clave estaba en la simetría: dada una solución de la ecuación diferencial en estudio, Lie analizaba si podía aplicar una transformación (de un grupo determinado) y ver si el resultado era también una solución. Y si encontraba transformaciones de ese tipo, tenía un mecanismo para encontrar más soluciones, puesto que la transformación de simetría de una solución también sería una solución. De esta manera, se vio conducido a la cuestión de encontrar el grupo de simetría de las ecuaciones diferenciales, donde grupo es el término que se emplea para aquellas estructuras matemáticas, o conjuntos, G, en las que se ha definido una operación, o, o ley de composición, que cumple las siguientes condiciones:

1) contiene la identidad I (A o I = A), donde A es un elemento arbitrario de G.

2) para todo elemento del grupo, A, existe su inverso, A-1, tal que A o A-1 = I

3) el producto de dos operaciones es un elemento del grupo: (A o B) o C = D, donde A, B y C son elementos arbitrarios de G.

Se dice que un grupo es abeliano, o conmutativo, si para toda pareja A, B, A o B = B o A.

Desde este punto de vista, el grupo de Lie de una ecuación diferencial expresa una simetría, esto es, una regularidad, que resume la ecuación en cuestión, y si esta describe un cierto fenómeno físico, entonces el grupo tiene que ver con esa simetría.

Como vemos, la teoría de grupos está estrechamente relacionada con las simetrías. Por ello, no es sorprendente que la teoría de grupos terminase siendo introducida en la física cuántica; primero, en el estudio de los espectros atómicos y moleculares y, luego, en la física de altas energías, donde constituyó una ayuda inestimable en la compleja tarea de ordenar el conjunto de las partículas «elementales» existentes y englobarlas en una teoría de las fuerzas a que obedecen. «La simetría dicta la interacción», como señaló Chen Ning Yang (1980: 10).

En la introducción de la teoría de grupos en la física cuántica fueron especialmente importantes dos textos (ya aparecieron en el capítulo segundo): Gruppentheorie und Quantenmechanik de Hermann Weyl, Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren, de Eugene Wigner (1931, 1959), aunque también habría que recordar un tercero: Die Gruppentheoretische Methode in der Quantenmechanik, de Bartel L. van der Waerden (1932).[216]

Al principio, el nuevo lenguaje matemático no fue bienvenido por todos. En el «Prefacio a la segunda edición» alemana de Gruppentheorie und Quantenmechanik, Weyl (1932, 1950: x) señalaba que «se ha rumoreado que la “peste de los grupos” está gradualmente alejándose de la física cuántica», una alusión a Wolfgang Pauli, quien introdujo la expresión «die gruppenpest».[217] Debido a la resistencia encontrada, Weyl se esforzó reiteradamente en sus artículos en defender la utilidad de la teoría de grupos en la física cuántica. «Me he esforzado», escribía (Weyl 1929 c: 279) en una publicación del Instituto Rice (Houston, Texas), «por demostrar claramente la correspondencia entre el lenguaje de la mecánica clásica y el de la teoría cuántica. No puede existir duda de que en la misma medida en que el uso de vectores, capaces de representar todas las magnitudes y direcciones, y sus composiciones aditivas, fue un instrumento matemático apropiado para la mecánica clásica, la descomposición en subespacios invariantes relativos a un grupo determinado y la composición

mutiplicativa de sus representaciones, son las operaciones matemáticas básicas para la descripción de los mismos fenómenos físicos en la nueva mecánica». Y, tal vez para evitar críticas y no arriesgarse demasiado, añadía: «Pero estoy lejos de exagerar la importancia de semejante lenguaje matemático. Sucede lo mismo que con el lenguaje ordinario; es verdad que puede ser de considerable ayuda para el pensamiento, que estrictamente debería estar dirigido al asunto en cuestión, al que le asiste fijando el conocimiento parcial del que ya se dispone para uso posterior. Pero también es cierto que conlleva el peligro de alejar el espíritu de lo que realmente interesa, conduciéndolo al vacío; ocasionalmente, poetas y filósofos han hecho una virtud de tal predicamento. Pero, después de todo, el revestimiento de las relaciones físicas con un simbolismo matemático adaptado a otros propósitos no se debe tolerar durante mucho tiempo; en consecuencia, sería poco agradecido por parte de la física rechazar el servicio de ayuda de cámara realizado por las matemáticas al despojarla de una prenda desfasada y astrosa».

Con anterioridad a la física de altas energías, el «espíritu de las simetrías» se introdujo en la física del siglo XX a través de las dos teorías relativistas de Einstein, que, como vimos, se basan en dos principios de simetría: el grupo de transformaciones de Lorentz para la relatividad especial y el grupo de transformaciones generales para la relatividad general. Por otra parte, fue precisamente con la formulación mediante el principio variacional (esto es, utilizando lagrangianos), como la matemática alemana Emmy Noether (1882-1935), que por entonces pugnaba (a la postre vanamente) por abrirse camino en el machista mundo universitario germano, obtuvo un resultado de gran importancia para la física teórica posterior: un modo de relacionar simetrías (o invariancias) y leyes de conservación. Es el hoy denominado «teorema de Noether» (Noether 1918 a, b).[218] El mero hecho de que un resultado como este hubiese escapado durante casi dos siglos a la atención de los fundadores del cálculo variacional constituye una prueba de la escasa atención que hasta comienzos del siglo XX se prestó al estudio de las simetrías. Fue utilizando el teorema de Noether como un matemático de Gotinga, Eric Bessel-Hagen (1921), demostró un resultado tan general e importante como el de que las, conocidas con anterioridad, diez leyes de conservación de la mecánica newtoniana estaban ligadas a simetrías, a las diez transformaciones del grupo de Galileo: las leyes de conservación de la energía, del momento lineal y del momento angular, son consecuencia de, respectivamente, la invariancia bajo traslaciones temporales, traslaciones espaciales y rotaciones espaciales, mientras que la ley de conservación que expresa el movimiento uniforme del centro de masa surge de

las transformaciones entre sistemas inerciales en movimiento relativo (principio de relatividad).[219]

Una simetría que resultó ser central en la búsqueda de una teoría que describiese el conjunto de las partículas elementales y sus interacciones, fue una emparentada con la teoría, ya mencionada anteriormente, con la que Herman Weyl intentó tratar la relatividad general de manera que gravitación y electromagnetismo apareciesen como la manifestación de una estructura geométrica común. En 1929, Weyl publicó dos artículos, ambos titulados «Electrón y gravitación» (Weyl 1929 a, b), que se pueden tomar como una extensión de sus ideas de 1918: impresionado por el parecido de cómo se deducían las leyes de conservación de la energía-momento (en la gravitación) y de la carga (en el electromagnetismo), relacionó la invariancia bajo trasformaciones generales de coordenadas (principio de relatividad general) de la teoría einsteiniana de la gravitación con la invariancia de la que en el electromagnetismo se deducía la conservación de la carga, conocida como invariancia gauge, y a la que consideró un principio fundamental para cualquier interacción.[220]

A pesar de lo fructífera que terminó siendo esta idea, al principio también encontró resistencias; de nuevo del mordaz Pauli, que al poco de aparecer el artículo de Weyl en los Proceedings of the National Academy of Sciences (Weyl 1929 a) le escribía:[221] «Ante mí se halla la edición de abril de los Proc. Nat. Acad (U. S.). No solo contiene un artículo suyo bajo la entrada “Física”, sino que muestra que usted está ahora en un “Laboratorio de Física”: por lo que oigo, incluso le han dado una cátedra de “Física” en América. Admiro su coraje; como es inevitable la conclusión de que desea ser juzgado, no por éxitos en matemática pura, sino por su verdadero pero infeliz amor por la física». Lo que, con otras palabras, Pauli estaba diciendo a Weyl era: «Deje, querido matemático, de meter sus narices en la física, que no hace sino perjudicarla». No obstante, Pauli podía ser, era, mordaz e inclinado a criticar a prácticamente todo el mundo, pero, en absoluto era tonto, y no tardó en comprender. «En contraste con las desagradables cosas que le dije, particularmente por su trabajo en Z. f. Physik [Weyl 1929 b], la parte esencial de mi última carta ha sido desautorizada desde entonces. Por esta razón, incluso luego he lamentado lo que le escribí. Después de estudiar su artículo creo que he entendido realmente lo que quería hacer (esto no es el caso con respecto a su pequeña nota en los Proc. Nat. Acad.).» Con la bendición de Pauli, la invariancia gauge tomaba fuerza para lo que sería un largo y complejo camino.

Existen, por supuesto, muchos tipos de simetrías. Una de las no estándar fue introducida por Heisenberg (1932 a, b, 1933), quien poco después de que se demostrase la existencia de los neutrones, y de que en los núcleos atómicos solo existían protones y neutrones, no electrones, introdujo la idea de considerar a protones y neutrones como «estados» diferentes de un mismo tipo de partícula, a la que se denominó «nucleón». Como tanto protón como neutrón son fermiones con espín ½, se necesitaban unos «grados de libertad» suplementarios para distinguirlos, para lo cual Heisenberg utilizó las matrices 2×2 que había introducido Pauli para el espín. Básicamente, lo que hizo Heisenberg es mostrar que la simetría protón-neutrón, algo así como una «fuerza de intercambio», se podía describir matemáticamente de forma parecida a cómo se hacía con el espín; de ahí el nombre que terminó acuñándose para ella: isospín («parecido al espín», o espín isotópico, también espín isobárico), teniendo tanto el protón como el neutrón un isospín de valor ½ pero con proyección diferente (tercera componente) que para el protón tiene el valor +½, mientras que para el neutrón es –½. Ahora bien, si tenemos en cuenta que los núcleos atómicos son estables (fenómenos radiactivos aparte), tienen que serlo, claro está, porque existe una fuerza que une a protones y neutrones; la interacción fuerte, desde esta perspectiva, la simetría nucleónica protón-neutrón se puede entender como ligada a, o manifestación de, la interacción (fuerte) que permite tal estabilidad. En definitiva, Heisenberg abrió el camino a la aplicación de la mecánica cuántica en el interior del núcleo, lo que, inevitablemente, también significaba la desintegración β, un fenómeno, que como ya sabemos, también se produce en el interior del núcleo (de hecho, como apunté en el capítulo primero, en sus artículos de 1932-1933 Heisenberg también trató de esta desintegración).

Y en este punto, obviando un buen número de desarrollos intermedios, me referiré a una contribución de gran importancia debida a Chen Ning Yang (con quien ya nos hemos encontrado anteriormente en este capítulo, al tratar las partículas elementales) y Robert Lawrence Mills.

Mientras estaba en Chicago (esto es, antes de 1949, cuando se trasladó al Instituto de Estudio Avanzado de Princeton), Yang se interesó por la interacción de isospín y trató, sin éxito, de generalizarla siguiendo el espíritu de la simetría gauge. «Pero según se fueron descubriendo más y más mesones», recordó en un volumen que contiene una selección de sus artículos (Yang 1983, O'Raifeartaigh 1997: 182), «y se consideraban todos los tipos de interacción, la necesidad de disponer de un principio para escribir las interacciones se me hizo aún más evidente». Y a ese problema volvió mientras estuvo en Brookhaven en el verano

de 1953. Su compañero de despacho allí era Robert Mills, con quien trabajó, produciendo finalmente un artículo que se convertiría en un clásico que guiaría el camino hacia la unificación de las fuerzas electromagnética y débil (Yang y Mills 1954 b). En un breve resumen, previo a esa publicación, Yang y Mills (1954 a) explicaban bien lo que habían hecho:

La conservación del espín isotópico apunta a la existencia de una ley de invariancia fundamental similar a la conservación de la carga eléctrica. En este segundo caso, la carga eléctrica sirve como fuente del campo electromagnético; y un concepto importante es la invariancia gauge que está estrechamente relacionada con (1) la ecuación del movimiento del campo electromagnético, (2) la existencia de una densidad de corriente, y (3) las posibles interacciones entre un campo cargado y el campo electromagnético. Hemos tratado de generalizar este concepto de invariancia gauge de manera que se aplique a la conservación del espín isotópico. Resulta que es posible una generalización muy natural. El papel que desempeña el campo electromagnético lo representa ahora un campo vectorial que satisface una ecuación vectorial incluso en ausencia de otros campos. (Porque, a diferencia del campo electromagnético, este campo tiene un espín isotópico y, en consecuencia, actúa como su propia fuente.) La existencia de una densidad de corriente es automática y la interacción de este campo con otros [...] tiene forma definida.

Como dije, la teoría de Yang-Mills constituyó una ayuda fundamental para trabajos posteriores sobre las fuerzas electromagnética y débil.[222] Pero antes de entrar en este punto, y siguiendo un orden cronológico, me voy a ocupar de otro trabajo de gran importancia en el que también participó Yang, esta vez con Tsung-Dao Lee (n. 1926), físico chino-americano como Yang. Para ello, es preciso retomar las simetrías.

Como indiqué, entre los numerosos tipos de simetrías, además de las citadas, existen otras muy fundamentales, de las que ahora citaré las siguientes:

(a) Invariancia bajo inversión espacial ($x \rightarrow -x$); esto es, con respecto al origen de coordenadas espaciales, a través de una línea recta, que indica que las coordenadas espaciales alteran su signo. En el lenguaje de la física cuántica, el

correspondiente operador se denota por P (parity, es decir, paridad).

(b) Invariancia bajo inversión del tiempo ($t \rightarrow -t$); esto es, cuando se invierte el sentido del movimiento: reemplazar una partícula por la misma pero que se mueve con velocidad opuesta. Su operador cuántico se denota por T.

(c) Invariancia bajo conjugación de carga ($e \rightarrow -e$); esto es, cuando se cambia el signo de la carga, lo que en el contexto de la física de partículas elementales significa reemplazar una partícula por su antipartícula, sin cambiar su posición o velocidad. Su operador cuántico se denota por C.

A mediados de la década de 1950, el físico alemán Gerhart Lüders (1954) demostró lo que se conoce como «teorema CPT», esto es, que todo sistema cuántico es invariante bajo el producto de las simetrías C, P y T, aunque lo demostró en el caso particular de que en la teoría cuántica de campos, la invariancia P necesariamente implica la invariancia CT. El año siguiente, Pauli (1955) reelaboró la derivación de Lüders; escribiendo (Pauli 1955: 33) «su demostración no es fácil de comprender, porque utiliza suposiciones innecesarias», pero el teorema encontró su planteamiento más general en manos de Res Jost (1957), un discípulo de Gregor Wentzel y ayudante de Pauli, el cual le agradecía, en uno de sus artículos de 1955, al igual que a Lüders, «sus interesantes discusiones sobre la generalidad de la reflexión fuerte».

Con este bagaje en mente, Lee y Yang (1956) realizaron un estudio sistemático de los datos experimentales relativos a la conservación de la paridad (inversión espacial). Encontraron evidencias de que la ley de conservación de la paridad era válida en el electromagnetismo y en la interacción fuerte, mientras que los datos experimentales que analizaron en el caso de la interacción débil no arrojaban ninguna luz sobre ese punto: las magnitudes medidas hasta entonces no eran sensibles a la conservación de la paridad. Por tanto, no se sabía si la invariancia bajo paridad se conservaba o no en la interacción débil. Para aclarar el punto, sugerían un experimento concreto: medir la distribución angular de los electrones producidos en la desintegración β en la que el cobalto-60 da lugar al niquel-60 más un electrón y un neutrino electrónico. Como señaló el físico nuclear e historiador de la ciencia serbio Milorad Mladjenovic (1988: 276): «Este fue uno de esos raros momentos en la historia de la física, en el que los teóricos proponen un experimento crucial para probar una nueva teoría. La

diferencia era que los experimentadores no estaban buscando un efecto pequeño, como el predicho por Einstein de que los rayos del Sol son atraídos por la gravedad; el efecto sería fácilmente observable, si se llevase a cabo. Sin embargo, la estructura experimental no era sencilla».

El experimento en cuestión lo realizó un equipo dirigido por la física experimental de la Universidad de Columbia (Nueva York), Chien-Shiung Wu, chino-americana (se instaló en Estados Unidos, en Berkeley, en 1936), al igual que Yang y Lee. De hecho, la idea del experimento había nacido de una conversación de Wu con Lee, colega suyo en Columbia, y Yang (ambos le agradecían «sus interesantes discusiones y comentarios» al final de su artículo), que tuvo lugar en la primavera de 1956. Wu preguntó entonces a Lee si alguien había pensado en experimentos en los que se pudiese comprobar si se conservaba la paridad en la interacción débil, a lo que este respondió mencionando ideas tales como utilizar núcleos polarizados resultantes de reacciones nucleares, o un haz de neutrones lentos polarizados procedentes de un reactor nuclear. Entonces Wu pensó que lo mejor sería una fuente de cobalto-60 y que aquello «era una oportunidad de oro» (Wu 1973; Hargittai 2012: 40). Aquella misma primavera, Wu comenzó a planear el experimento, que ciertamente era muy complejo, y como de hecho ella carecía de la experiencia y del equipo para llevarlo a cabo contactó con Ernest Ambler, del National Bureau of Standards (NBS), Washington D. C., que aceptó colaborar, incorporándose finalmente al proyecto otros tres miembros del NBS, Ralph Hudson, un experto en criogenia, y Raymond Hayward y Dale Hoopes, especialistas en detección de radiaciones.

El equipo se puso a trabajar en seguida, aunque Wu no podía participar demasiado debido a sus obligaciones docentes en Columbia. De hecho, no estaba presente el 27 de diciembre de 1956 cuando sus colegas del NBS vieron las primeras señales de la asimetría que demostraba la violación de la paridad en la interacción débil. En un trabajo de poco menos de dos páginas de Physical Review, Wu, Ambler, Hayward, Hoppes y Hudson (1957) anunciaron su sensacional descubrimiento, por el que Yang y Lee recibieron el Premio Nobel de Física ese mismo año.

De acuerdo con el teorema CPT, la violación de P implica la de CP para que el producto CPT se conserve, y lo mismo sucede con las otras posibles combinaciones de estas tres simetrías.

En su momento, la confirmación obtenida por Wu de que la predicción de Lee y Yang era correcta, produjo un fuerte impacto. No olvidemos cuán firmemente introducidas se encuentran en la mente de los científicos la idea de principios de conservación; constituyen una de las piezas más sólidas y fiables en la búsqueda de leyes que expliquen los fenómenos de la naturaleza. La noticia se difundió rápidamente. El 15 de enero de 1957, John Blatt escribía desde Princeton a Pauli (Von Meyenn, ed. 2005: 74): «No sé si alguien le ha escrito ya sobre el repentino fallecimiento de la paridad. Miss Wu ha realizado un experimento utilizando la desintegración beta de núcleos de Co orientados que demuestran que la paridad no se conserva en la desintegración β [...] Todos estamos sorprendidos por la muerte de nuestra querida amiga, la paridad [...] Cualquier físico que hubiese supuesto hace, digamos, cinco años lo que ahora sabemos que son hechos experimentales sobre partículas extrañas, desintegración β, y cosas por el estilo, habría sido tomado por loco, y con razón». Cuatro días después, Pauli se dirigía a Wu (Von Meyenn, ed. 2005: 89):

Querida Wu,

De Estados Unidos me llegan noticias excitantes (Blatt me escribió una carta desde Princeton) sobre la simetría en la distribución angular de su experimento de desintegración beta con espines nucleares orientados, indicando una restricción de la asimetría derecha-izquierda de la teoría, de tal manera que el intercambio derecha-izquierda debe estar acoplado con el cambio de signo de la «carga leptónica» (lo que significa neutrino ←/→ antineutrino, e+ ←/→ e-), si es que he entendido correctamente a Blatt.

Cuando yo consideré formalmente estas posibilidades en mi artículo del volumen del Festival-Bohr [Pauli 1955], no pensé que esto podría tener algo que ver con la Naturaleza. Lo consideré como un mero juego matemático y, de hecho, no creí en ello cuando leí el artículo de Yang y Lee [...]

Lo que me impidió hasta ahora aceptar esta posibilidad formal es la cuestión de por qué esta restricción de inversión especular únicamente aparece en las interacciones débiles, no en las fuertes. Teóricamente, no se me ocurre ninguna interpretación de este hecho, que empíricamente está tan bien establecido. ¿Sabe de alguien en Estados Unidos que tenga verdaderas ideas sobre esto?

A Valentin Telegdi, entonces en la Universidad de Chicago (en 1976 la abandonó para incorporarse a la ETH —Eidgenössische Technische Hochschule, Escuela Politécnica Federal— de Zúrich, de cuyo cuerpo docente formaba parte Pauli), que también había realizado experimentos sobre la violación de la paridad, Pauli le escribía muy razonablemente el 22 de enero (Von Meyenn, ed. 2005: 101): «En esta ocasión, me equivoqué en mis previsiones. Pero todavía no comprendo por qué las interacciones fuertes son invariantes bajo reflexión (invariancia bajo paridad, P, en la notación de Oehme-Yang-Lee), ¿cómo la fuerza de una interacción puede producir, o imponer, una propiedad de invariancia?». Y unos días después (27-28 de enero de 1957) hacía partícipe de sus preocupaciones a Victor Weisskopf (Von Meyenn, ed. 2005: 125):

Lo que me sorprende no es el hecho de que «Dios es zurdo», sino el hecho de que a pesar de esto Él se muestra a Sí Mismo como simétrico derecha-izquierda cuando Él se manifiesta fuertemente. En resumen, el verdadero problema es por qué la interacción fuerte es simétrica derecha/izquierda. ¿Cómo puede la fuerza de una interacción producir o crear grupos de simetría, invariancias o leyes de simetría? Esta pregunta me condujo a una respuesta prematura y equivocada.

No es difícil comprender la resistencia de Pauli a abandonar principios de conservación. Recordemos que de muy joven se había relacionado con Felix Klein, el autor del Programa de Erlangen, quien le informó de los resultados obtenidos por Emmy Noether y por Erich Bessel-Hagen, a los que ya me he referido: Klein encargó a Pauli, que entonces solo tenía 19 años, que escribiese el artículo sobre relatividad para la Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften que él dirigía (Pauli 1921). En consecuencia, Pauli se familiarizó con el papel de los principios de invariancia en la física teórica desde el comienzo de su carrera científica.[223]

A pesar de que se demostrase que la invariancia bajo paridad no siempre se conserva, continuó aceptándose que se mantenía la invariancia combinada CP (conjugación de carga-reflexión espacial). Sin embargo, resultó que la naturaleza tampoco respetaba esta regla, como se demostró en experimentos realizados con

la desintegración de kaones neutros, en el Brookhaven National Laboratory en 1964 (Christenson, Cronin, Fitch y Turlay 1964). Al igual que en el caso de la paridad, la prueba de la no invariancia de CP condujo a que a sus dos principales responsables, James Cronin y Val Fitch, se les concediese el Premio Nobel de Física en 1980. Como vemos, la violación de simetrías en la física de partículas elementales fue un magnífico semillero de Premios Nobel.

Lejos de lo que se puede imaginar, la violación de CP ofrecía una posible solución a un grave problema; en palabras, ya en el siglo XXI, de Jack Steinberger (2005: 96):

La violación de CP también desempeña un papel principal en nuestra comprensión del Universo, que sabemos no es simétrico con respecto al intercambio de materia y antimateria. Todo lo que observamos está formado de bariones, esto es, de materia y no de antimateria. No se han observado estrellas de antibariones. Este rasgo del Universo, esencial para la propia existencia de casi todo lo que vemos, incluyendo a nosotros mismos, debe ser consecuencia de algún proceso que viole CP y que tuviera lugar en los primeros momentos de la formación del Universo. Se cree, sin embargo, que el mecanismo de la violación de CP en el Big Bang no puede ser el mismo que el responsable de la desintegración K [donde se identificó en 1964 esa violación]. Todavía no se conoce una explicación teórica de ninguna de estas manifestaciones de la violación de CP.

TEORÍAS DE UNIFICACIÓN

Como se explicó en el capítulo primero, al considerar las fuerzas nucleares, la evidencia de la desintegración β y la teoría elaborada por Fermi en 1932 para su explicación, teoría mejorada en 1958 por George Sudarshan y Robert Marshak (1957, 1958) y por Richard Feynman y Murray Gell-Mann (1958) representaron un avance notable para la comprensión de la interacción débil. Pero más importante fue un trabajo posterior del físico estadounidense Sheldom Glashow, un antiguo doctorando de Schwinger en Caltech, quien durante su estancia en el Instituto de Bohr, en Copenhague, como becario posdoctoral de la National Science Foundation, escribió un artículo (publicado cuando ya estaba de vuelta en Caltech) en el que introducía una teoría para unificar las interacciones electromagnética y débil. «A primera vista», escribía Glashow (1960: 579), «puede parecer que existe poco o ningún parecido entre los efectos electromagnéticos y los fenómenos asociados a las interacciones débiles». Y continuaba:

Sin embargo, surgen ciertos paralelismos notables si suponemos que las interacciones débiles están mediadas por bosones inestables. Ambas interacciones son universales, ya que basta con una sola constante de acoplo para describir una amplia clase de fenómenos [...] Schwinger fue el primero que sugirió la existencia de un triplete de campos vectoriales «isotópicos», cuyos acoplos universales generarían ambas interacciones, la débil y la electromagnética.[224]

Los bosones inestables a los que se refería Glashow, tres bosones vectoriales mediadores, deberían tener, respectivamente, carga positiva, negativa y nula, y masa no nula «mayor que la del mesón K». El problema era, claro, que el «mediador» de la interacción electromagnética, el fotón, tiene masa cero. «Seguramente», añadía Glashow, «ese es el principal obstáculo para desarrollar la analogía entre los hipotéticos mesones vectoriales y los fotones». La guía que vislumbraba para superar tal obstáculo era «descubrir un principio de simetría que relacione las formas de los acoplos débil y electromagnético». El principio

en cuestión tendría que ver con la simetría gauge.[225]

Los tres bosones vectoriales intermedios de Schwinger-Glashow son las partículas W+, W- y Z que nos aparecieron brevemente con anterioridad en este mismo capítulo, al tratar del CERN. «En el modelo de Glashow», explicaba el físico teórico de partículas español Francisco Ynduráin (2006: 175-176), «se reconoce que, debido a que la partícula Z tiene propiedades parecidas al fotón, se mezcla con ella y por tanto hay que tratar simultáneamente interacciones débiles y electromagnéticas. Es decir, el campo electromagnético que observamos en la naturaleza no es el que existiría si no hubiese interacciones débiles, y la partícula Z es distinta de la que tendríamos en un mundo hipotético en que no existiese el electromagnetismo. Para poner esto de manifiesto suele denotarse por W0 a la partícula neutra de las interacciones débiles, en ausencia (hipotética) de electromagnetismo». La idea era sugerente y anunciaba claramente una unificación de las interacciones débil y electromagnética, pero existían graves problemas: el más importante que no se sabía cómo dotar a las partículas W y Z de masa. Este problema fue resuelto por Steven Weinberg (1967) y, el año siguiente, e independientemente, por el paquistaní (afincado en Inglaterra) Abdus Salam (1968).[226] Veamos cómo comenzaba el artículo de Weinberg (1967: 1264):

Los leptones [partículas a las que no les afecta la interacción fuerte] interaccionan solamente con fotones, y con los bosones intermedios que presumiblemente transportan las interacciones débiles. ¿Qué podía ser más natural que unificar estos bosones de espín 1 en un multiplete de campos gauge? Entorpeciendo el camino hacia esa síntesis se encuentran las obvias diferencias en las masas del fotón y del bosón intermedio, y de sus acoplos. Podemos esperar comprender estas diferencias imaginando que las simetrías que relacionan las interacciones débil y electromagnética son simetrías exactas del lagrangiano, pero que las rompe el vacío [...] Esta nota describe un modelo en el que la simetría entre las interacciones electromagnética y débil se rompe espontáneamente [...] El modelo puede ser renormalizable.

La cita anterior muestra tres puntos importantes. El primero, la presencia de la simetría gauge, confirmando el relevante papel que, como apunté, ha

desempeñado en el mundo de la física teórica de altas energías. El segundo, la ruptura espontánea de simetrías por el vacío. Y el tercero, que se esperaba, pero no se había demostrado, que la teoría fuese renormalizable.

En su artículo, Weinberg citaba varias referencias como las responsables de haber introducido la idea de la ruptura de simetría por el vacío. Se referían a los trabajos de Peter Higgs (1964 a, b, 1966), del Instituto Tait de Física Matemática de la Universidad de Edimburgo, de François Englert y Robert Brout (1964), de la Facultad de Ciencias de la Universidad Libre de Bruselas, de Gerald S. Guralnik, Carl R. Hagen y Thomas W. Kibble (1964), del Departamento de Física del Imperial College de Londres. Ha sido el nombre del autor del primero de estos trabajos el que ha acaparado la idea, conocida como «mecanismo de Higgs». Su propuesta suponía que el vacío está lleno de un campo, al que se bautizó como «campo de Higgs». Todas las partículas interaccionan con ese campo y es la resistencia que este produce al movimiento de las partículas lo que hace que estas adquieran algo indistinguible de una masa. La analogía a la que habitualmente se recurre es la siguiente (Ynduráin 2006: 178-179): «Imaginemos una piscina de agua muy, muy clara. Un rayo de luz la atraviesa prácticamente sin enterarse, porque la luz (apenas) interacciona con el agua. Pero si nosotros intentamos andar dentro de la piscina, en un lugar en el que el agua no nos cubra, encontraremos una resistencia a avanzar, como si tuviésemos más masa de la propia nuestra. Por supuesto, esta masa es la masa del agua (que sí interacciona con nuestros cuerpos) que tenemos que arrastrar y desplazar. De la misma manera, los fotones — que no interaccionan con el campo de Higgs — atraviesan el espacio sin ser afectados por su presencia, mientras que las partículas W o Z, que sí interaccionan con el campo de Higgs, sienten su presencia, en particular en forma de un aumento de masa».

Fueron Weinberg y Salam-Ward, no Higgs y los demás científicos que pensaron de manera semejante a él, los que se dieron cuenta de que el mecanismo de Higgs salvaba el modelo de Glashow. Pero quedaba el problema de demostrar si la teoría era renormalizable o no. Sin duda por este problema, y por el relacionado con él de que nadie era capaz de realizar cálculos más allá de la primera aproximación, el modelo de Glashow-Weinberg-Salam no recibió demasiada atención durante los siguientes cuatro años... hasta que dos holandeses, Gerardus ‘t Hooft y Martinus J. G. Veltman demostraron esa renormalizabilidad (‘t Hooft 1971, ‘t Hooft y Veltman 1972).[227] Un año después, en 1973, se comprobó experimentalmente en el CERN una de las predicciones de su teoría, la existencia de las denominadas «corrientes neutras

débiles» (interacciones débiles sin intercambio de carga, y mediadas por la partícula Z). La consecuencia final fue que Weinberg, Salam y Glashow compartieron el Premio Nobel de Física de 1979. En 1999, el mismo galardón fue concedido a ‘t Hooft y Veltman.

Mencioné con anterioridad que los bosones W+, W- y Z se encontraron en 1983 en el Súper Sincrotrón de Protones (SPS) del CERN. Se necesitaba, efectivamente, un acelerador que alcanzase grandes energías para producir estas partículas, demasiado pesadas para las máquinas que existían antes de esa fecha. Fue el grupo liderado por el italiano Carlo Rubbia (que compartía su tiempo entre el CERN y Harvard) el que consiguió demostrar su existencia. El artículo en el que se realizó el anuncio, iba firmado (siguiendo el orden alfabético) por 125 científicos (Arnison et al. 1983), pertenecientes al CERN, al Centre d’Études Nucléaires de Saclay, la Universidad Técnica de Aquisgrán, las Universidades de Birmingham, Helsinki, Roma, California (Riverside), el Rutherford Appleton Laboratory (Chilton) y el Collège de France. Una verdadera colaboración internacional.

El anuncio causó sensación en la comunidad de físicos, tanta que el año siguiente Rubbia y Simon van der Meer, que ideó una tecnología (enfriado estocástico) vital para el funcionamiento del Súper Colisionador, recibieron el Premio Nobel de Física de 1984. La participación de Van der Meer nos recuerda el papel esencial que la tecnología desempeña en la física experimental de altas energías. Y no se trata únicamente de los aceleradores propiamente dichos: no se conseguiría nada sin disponer de detectores de partículas, máquinas, a su vez, gigantescas, al igual que prodigios tecnológicos.

En el contexto cuántico, todo campo lleva «asociado» una partícula, su cuanto. Por consiguiente, cuando se introdujo el campo de Higgs se le asoció una partícula, a la que se terminó conociendo como «bosón de Higgs», y también y por la influencia de un libro de divulgación (Lederman y Teresi 1993), como «partícula divina» («God particle»). Pues bien, como ya tuve ocasión de señalar, casi medio siglo después de que esta partícula hubiese sido predicha, el 4 de julio de 2012, el bosón de Higgs fue finalmente detectado en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC).[228] Sorprendentemente, hasta cierto punto, la noticia recibió una cobertura mediática universal y en 2013 François Englert y Peter Higgs compartían el Premio Nobel de Física, «por el descubrimiento teórico de un mecanismo que contribuye a nuestra comprensión del origen de la masa de partículas subatómicas, y que recientemente ha sido confirmado a través

del descubrimiento de la partícula fundamental predicha en los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones del CERN». Por entonces, Robert Brout, el coautor con Englert del artículo de 1964, había fallecido, y la Academia Sueca no consideró oportuno reconocer de alguna manera a los responsables de la tercera publicación sobre el tema, a Guralnik, Hagen y Kibble.

La teoría electrodébil unificaba la descripción de las interacciones electromagnética y débil, pero ¿no sería posible avanzar por la senda de la unificación, encontrando una formulación que incluyese también a la interacción fuerte, descrita por la cromodinámica cuántica? La respuesta, positiva, a esta cuestión vino de la mano de Howard Georgi y Glashow (1974), que introdujeron las primeras ideas de lo que se vino en denominar Teorías de Gran Unificación (GUT).

El impacto principal de esta familia de teorías se ha producido en la cosmología; en concreto en la descripción de los primeros instantes del Universo. Desde la perspectiva de las GUTs, al principio existía solo una fuerza que englobaba las electromagnética, débil y fuerte, que fueron separándose al irse enfriando el Universo. Con semejante equipaje teórico es posible ofrecer explicaciones de cuestiones como el hecho de que exista (al menos aparentemente y para nuestra fortuna) más materia que antimateria en el Universo. Esto es debido a que las GUTs tienen en común que en ellas no se conserva una magnitud denominada «número bariónico», lo que significa que son posibles procesos en los que el número de bariones producidos —entre los que se encuentran, recordemos, los protones y los neutrones— no es igual al de antibariones. Utilizando esta propiedad, el físico japonés Motohiko Yoshimura (1978) demostró que un estado inicial en el que exista igual número de materia y antimateria puede evolucionar convirtiéndose en otro con más protones o neutrones que sus respectivas antipartículas, produciendo así un universo como el nuestro, en el que hay más materia que antimateria.

Gracias al conjunto formado por las anteriores teorías, poseemos un marco teórico extraordinario para entender de qué está formada la naturaleza. Su capacidad predictiva es increíble. De acuerdo con él, se acepta que toda la materia del Universo, las más de 100 partículas observadas, está formada por agregados de tres tipos de partículas elementales (y sus correspondientes antipartículas): leptones (electrones y sus parientes, muón y tau, neutrinos, electrónico, muónico y tauónico), quarks, y los cuantos asociados a los campos

de las cuatro fuerzas que reconocemos en la naturaleza (el fotón para la interacción electromagnética, las partículas, bosones gauge, Z y W para la débil, los gluones para la fuerte y, aunque la gravitación aún no se ha incorporado a ese marco, los aún no observados gravitones para la gravitacional), más el bosón de Higgs, responsable de las masas de los quarks y leptones. El subconjunto formado por la cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil (esto es, el sistema teórico que incorpora las teorías relativistas y cuánticas de las interacciones fuerte, electromagnética y débil) es especialmente poderoso si tenemos en cuenta el balance predicciones-comprobaciones experimentales. Es el denominado modelo estándar. De acuerdo al distinguido físico e historiador de la ciencia, Silvan Schweber (1997: 645), «la formulación del Modelo Estándar es uno de los grandes logros del intelecto humano, uno que rivaliza con la mecánica cuántica. Será recordado —junto a la relatividad general, la mecánica cuántica y el desciframiento del código genético— como uno de los avances intelectuales más sobresalientes del siglo XX. Pero, mucho más que la relatividad general y la mecánica cuántica, es el producto de un esfuerzo colectivo». Quiero hacer hincapié en esta última expresión, «esfuerzo colectivo».

Ahora bien, no obstante su éxito, obviamente el modelo estándar no es «la teoría final» (¿lo puede ser alguna teoría?). Por una parte, porque la interacción gravitacional queda al margen, pero también porque incluye demasiados parámetros que hay que determinar experimentalmente. Se trata de las, siempre incómodas pero fundamentales, preguntas del tipo «¿por qué?». ¿Por qué existen las partículas fundamentales que detectamos? ¿Por qué esas partículas tienen las masas que tienen? ¿Por qué, por ejemplo, el tau pesa alrededor de 3.520 veces lo que el electrón? ¿Por qué son cuatro las interacciones fundamentales, y no tres, cinco o solo una? ¿Y por qué tienen estas interacciones las propiedades (como intensidad o rango de acción) que poseen?

Y puesto que he mencionado la interacción gravitacional, y el problema de su unificación con las tres fuerzas restantes, diré que existen candidatos para cumplir ese espléndido sueño unificador: unos complejos edificios matemáticos llamados teorías de cuerdas.

Según la teoría de cuerdas, las partículas básicas que existen en la naturaleza son en realidad filamentos unidimensionales (cuerdas extremadamente delgadas) en espacios de muchas más dimensiones que las tres espaciales y una temporal de las que somos conscientes; aunque más que decir «son» o «están constituidas» por tales cuerdas, habría que decir, que «son manifestaciones» de vibraciones de

esas cuerdas. En otras palabras, si nuestros instrumentos fuesen suficientemente poderosos, lo que veríamos no serían «puntos» con ciertas características a los que llamamos electrón, quark, fotón o neutrino, por ejemplo, sino minúsculas cuerdas (cuyos cabos pueden estar abiertos o cerrados) vibrando. La imagen que suscita esta nueva visión de la materia más que «física» es, por consiguiente, «musical»: «del mismo modo que las diferentes pautas vibratorias de la cuerda de un violín dan lugar a diferentes notas musicales, los diferentes modelos vibratorios de una cuerda fundamental dan lugar a diferentes masas y cargas de fuerzas [...] El Universo —que está compuesto por un número enorme de esas cuerdas vibrantes— es algo semejante a una sinfonía cósmica», ha señalado el físico y él mismo miembro destacado de la «comunidad de cuerdas» Brian Greene (2001: 166-168) en un libro titulado El Universo elegante, un éxito editorial.

Es fácil comprender el atractivo que algunos sienten por estas ideas: «Las cuerdas son verdaderamente fundamentales; son “átomos”, es decir componentes indivisibles, en el sentido más auténtico de la palabra griega, tal como la utilizaron los antiguos griegos. Como componentes absolutamente mínimos de cualquier cosa, representan el final de la línea —la última de las muñecas rusas llamadas “matrioskas”— en las numerosas capas de subestructuras dentro del mundo microscópico» (Greene 2001: 163). Ahora bien, ¿qué tipo de materialidad es la de estos constructos teóricos unidimensionales? ¿Podemos pensar en ellos como una especie de «materia elemental» en algún sentido parecido a aquel en el que se piensa cuando se habla habitualmente de materia, incluso de partículas tan (a la postre, acaso, solo aparentemente) elementales como un electrón, un muón o un quark?

Decía antes que las teorías de cuerdas son unos complejos edificios matemáticos, y así es. De hecho, las matemáticas de la teoría de las cuerdas son tan complejas que hasta ahora nadie conoce ni siquiera las ecuaciones de las fórmulas exactas de esa teoría, únicamente se dispone de unas aproximaciones de dichas ecuaciones, e incluso estas ecuaciones aproximadas resultan ser tan complicadas que hasta la fecha solo se han resuelto parcialmente. No es por ello sorprendente que uno de los grandes líderes de esta disciplina sea un físico especialmente dotado para las matemáticas. Me estoy refiriendo al estadounidense Edward Witten. Para hacerse una idea de su talla como matemático basta con señalar que en 1990 recibió (junto a Pierre-Louis Lions, Jean-Christophe Yoccoz y Shigefumi Mori) una de las cuatro medallas Fields que se conceden cada cuatro años y que constituyen el equivalente, en el ámbito matemático, de los Premios

Nobel. Fue Witten (1995) quien argumentó, iniciando así lo que se denomina «la segunda revolución de las cuerdas», que para que la teoría de cuerdas (o supercuerdas) pueda aspirar a ser realmente una «Teoría del Todo», debe tener diez dimensiones espaciales más una temporal, esto es, once dimensiones (Witten denominó «Teoría M» a esa formulación).[229]

Enfrentados con las teorías de cuerdas, es razonable preguntarse si al avanzar en la exploración de la estructura de la materia no habremos alcanzado ya niveles en los que la «materialidad» —esto es, la materia— se desvanece transformándose en otra cosa diferente. Y ¿en qué otra cosa? Pues si estamos hablando de partículas que se manifiestan como vibraciones de cuerdas, ¿no será esa «otra cosa», una estructura matemática? Una vibración es, al fin y al cabo, la oscilación de algo material, pero en cuanto a estructura permanente tiene probablemente más de ente matemático que de ente material. Si fuese así, podríamos decir que se habría visto cumplido el sueño, o uno de los sueños, de Pitágoras. Los físicos habrían estado laborando duramente a lo largo de siglos, milenios incluso, para descubrir, finalmente, que la materia se les escapa de las manos, como si de una red se tratase, convirtiéndose en matemática, en estructuras matemáticas. La teoría de cuerdas, en resumen, resucita viejos problemas, acaso fantasmas. Problemas como el de la relación entre la física (y el mundo) y la matemática.

Independientemente de estos aspectos de naturaleza en esencia filosófica, hay otros que es imprescindible mencionar. Y es que, hasta la fecha, las teorías de cuerdas han demostrado muy poco, sobre todo si no olvidamos que la ciencia es explicación teórica, sí, pero también experimentos, someter la teoría al juez último que es la comprobación experimental. Las teorías de cuerdas son admiradas por algunos, comentadas por muchos y criticadas por bastantes, que insisten en que su naturaleza es excesivamente especulativa. Así, el físico norteamericano Lee Smolin (2007: 17-18) ha escrito en un libro dedicado a estas teorías:

En los últimos veinte años, se ha invertido mucho esfuerzo en la teoría de cuerdas, pero todavía desconocemos si es cierta o no. Incluso después de todo el trabajo realizado, la teoría no ha proporcionado ninguna predicción que pueda ser comprobada mediante experimentos actuales o, al menos, experimentos que podamos concebir en la actualidad. Las escasas predicciones limpias que

propone ya han sido formuladas por otras teorías aceptadas.

Parte de la razón por la que la teoría de cuerdas no realiza nuevas predicciones es que parece presentarse en un número infinito de versiones. Aun limitándonos a las teorías que coinciden con algunos de los hechos básicos observados sobre nuestro Universo, por ejemplo, su vasto tamaño o la existencia de energía oscura, nos siguen quedando algo así como 10500 teorías de cuerdas diferentes; es decir, un 1 con 500 ceros detrás, un número mayor que todos los átomos conocidos del Universo. Semejante cantidad de teorías, nos deja poca esperanza de poder identificar algún resultado de algún experimento que no se pudiera incluir en alguna de ellas. Por tanto, no importa lo que muestren los experimentos, pues no se puede demostrar que la teoría de cuerdas sea falsa, aunque lo contrario también es cierto: ningún experimento puede demostrar que sea cierta.

Recordemos en este punto que uno de los sistemas metodológicos de la ciencia más influyentes continúa siendo el construido por el filósofo de origen austriaco, instalado finalmente en la London School of Economics de Londres, Karl Popper, quien siempre insistió en que una teoría que no es refutable mediante ningún experimento imaginable no es científica; esto es, que si no es posible imaginar algún experimento cuyos resultados contradigan las predicciones de una teoría, esta no es realmente científica. Y aunque en mi opinión tal criterio es demasiado exigente para ser siempre verdad, constituye una buena guía. En cualquier caso, el futuro —¿el siglo XXI?— tendrá la última palabra sobre la teoría de cuerdas.[230]

CRUCE DE CAMINOS: FÍSICA CUÁNTICA, COSMOLOGÍA Y LA NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR

Otro de los grandes logros de la física del siglo XX, ha sido la reconstrucción teórica de los procesos que condujeron a formar los átomos que encontramos en la naturaleza, en el Universo, y de los que nosotros mismos estamos compuestos (la nucleosíntesis). De estas cuestiones se ocupa la física nuclear, una disciplina relacionada, naturalmente, con la física de altas energías, aunque esta sea más

«fundamental» al tratar con las estructuras más básicas que los núcleos atómicos. De hecho, la física de altas energías proporciona las bases sobre las que se asienta el edificio de la física nuclear y de la nucleosíntesis estelar. Han sido, en efecto, los físicos de altas energías los que se han preocupado, y se preocupan, de explicar cómo de la «sopa» indiferenciada de radiación y energía que surgió del Big Bang fueron formándose las partículas que constituyen los átomos.

Actualmente se piensa que al ir disminuyendo la temperatura del Universo, esa sopa primordial se fue diferenciando. A la temperatura de unos 30.000 millones de grados Kelvin (que se alcanzó en aproximadamente 0,11 segundos a contar desde el Big Bang), los fotones se independizaron, distribuyéndose uniformemente por el espacio. Únicamente cuando la temperatura del Universo bajó a los 3.000 millones de grados Kelvin comenzaron a formarse —mediante la unión de protones y neutrones —algunos núcleos estables, básicamente el hidrógeno (recordemos, un protón en torno al cual orbita un electrón) y el helio (dos protones y dos neutrones en el núcleo, con dos electrones como «satélites»). Estos dos elementos, los más ligeros que existen en la naturaleza, fueron —junto a fotones y neutrinos—, los principales productos del Big Bang, y representan aproximadamente el 73 por ciento (el hidrógeno) y el 25 por ciento (el helio) de la composición del Universo.

Tenemos, por consiguiente, que el Big Bang surtió generosamente al Universo de hidrógeno y de helio. Pero ¿y los restantes elementos? Porque no hace falta ser un experto para saber que existe el oxígeno, el hierro, el nitrógeno, el carbono, el plomo, el sodio, el cinc, el oro y muchos elementos más. ¿Cómo se formaron?

Antes incluso de que los físicos de altas energías comenzasen a estudiar la nucleosíntesis primordial, durante la primera mitad del siglo XX algunos físicos nucleares se ocuparon del problema de la formación de los elementos, más allá del hidrógeno y el helio. Entre ellos es obligado mencionar a Carl Friedrich von Weizsäcker en Alemania y a Hans Bethe en Estados Unidos (Weizsäcker 1938; Bethe y Critchfield 1938; Bethe 1939 a, b).[231] Ya mencioné en el capítulo segundo, las contribuciones de George Gamow (1932, 1946) y de Ralph Alpher y Robert Herman (1948), a las que hay que añadir un importante artículo firmado por los tres (Alpher, Herman y Gamow 1948). En la senda abierta con el artículo de este trío, destacan las contribuciones de Margaret y Geoffrey Burbidge, William Fowler, Fred Hoyle y Robet Wagoner, que armados con un conjunto mucho más completo de datos de reacciones nucleares, explicaron

cómo se sintetizan los elementos en las estrellas (Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle 1957) y por qué en el Universo el litio constituye una pequeña fracción (10-8) de la masa correspondiente al hidrógeno y al helio, mientras que el total de los restantes elementos representa un mero 10-11 (Wagoner, Fowler y Hoyle 1967).[232]

Gracias a aportaciones como estas — y las de muchos otros — ha sido posible reconstruir las reacciones nucleares más importantes en la nucleosíntesis estelar. Esbozaré sus rasgos más destacados, tal y como los entendía Bethe en 1967. [233]

La reacción más sencilla y básica es:

$$H + H \rightarrow D- + e+ + \nu$$

(esto es, hidrógeno más hidrógeno, da lugar a un deuterón, D (ión del deuterio) más un positrón y un neutrino. Esta reacción es muy lenta, ya que involucra la desintegración β, pero una vez formado el deuterón, este reacciona rápidamente produciendo finalmente helio. Se trata de la reacción que ya nos apareció:

$$H3+ H2 \rightarrow He4 + n1$$

Las posibles reacciones entre H y He no conducen a nada, porque no existen núcleos estables de masa 5. Y las del H con los siguientes elementos de la tabla periódica, litio (Li), berilio (Be) y boro (B), son muy rápidas a la temperatura del centro del Sol, pero es precisamente esa rapidez la que, en general, las descarta. [234] Por esta razón, todos estos elementos, del deuterio al boro, son extremadamente raros en la Tierra y en las estrellas.

El siguiente elemento, el carbono (C), que forma alrededor del 1 por ciento de la masa de una estrella recientemente formada, se comporta de manera diferente. En un gas estelar experimenta el siguiente ciclo de reacciones (N=nitrógeno,

O=oxígeno, γ=rayos gamma):

$$C12 + H \rightarrow N13 + \gamma$$

$$N13 \rightarrow C13 + e+ + \nu$$

$$C13 + H \rightarrow N14 + \gamma$$

$$N14 + H \rightarrow O15 + \gamma$$

$$O15 \rightarrow N15 + e+ + \nu$$

$$N15 + H \rightarrow C12 + He4$$

La última reacción es la más interesante, ya que cierra el ciclo, reproduciendo el carbono-12 con el que comenzó. Y si las temperaturas son suficientemente elevadas, los núcleos de carbono se combinan y desintegran de maneras muy diversas, dando lugar a elementos como magnesio (número atómico 12), sodio (11), neón (10) y oxígeno (8). A su vez, los núcleos de oxígeno pueden unirse y formar azufre y fósforo. De este modo, se fabrican elementos cada vez más pesados. Hasta llegar al hierro (26).

Hechos de este tipo nos conducen a otra cuestión: la de cómo han llegado estos elementos a la Tierra, puesto que el lugar en el que fueron fabricados necesita de energías y temperaturas que no se dan en nuestro planeta. Y si suponemos que no deben existir diferencias grandísimas entre nuestro planeta y los demás —salvo en detalles como composición o posibilidad de que exista vida—, cómo han llegado a cualquier otro planeta. Pues bien, una parte de los elementos (hasta el hierro) que no se produjeron en los primeros instantes del Universo, se han generado, sobre todo, en el interior de estrellas. La emisión al espacio exterior de esos elementos puede tener lugar de tres maneras: mediante la lenta pérdida de masa en estrellas viejas, en la denominada fase «gigante» de la evolución estelar; durante los relativamente frecuentes estallidos estelares que los astrónomos denominan «novas»; y en las dramáticas y espectaculares explosiones que se producen en la etapa estelar final que alumbran las denominadas «supernovas» (una de estas explosiones fue detectada en 1987: la supernova SN1987A; la

explosión había tenido lugar 170.000 años antes, el tiempo que ha tardado la luz en llegar a la Tierra).

Es sobre todo en la explosión de las supernovas cuando los elementos pesados fabricados en la nucleosíntesis estelar se difunden por el espacio. No se conoce demasiado bien por qué se producen estas explosiones, pero se cree que, además de expulsar los elementos que acumulaba la estrella en su interior (salvo parte que retiene convertidos en objetos muy peculiares, como estrellas de neutrones), en el estallido se sintetizan elementos todavía más pesados que el hierro; elementos como el cobre, cinc, rubidio, plata, osmio, uranio, y así hasta una parte importante de los más de cien elementos que contiene en la actualidad la tabla periódica, y que son relativamente abundantes en sistemas estelares como el nuestro, el sistema solar.

Precisamente por esta abundancia de elementos pesados, parece razonable pensar que el Sol es una estrella de segunda generación, formada, algo menos de 5.000 millones de años, por la condensación de residuos de una estrella anterior que murió en una explosión de supernova. El material procedente de semejante explosión se agrupó en un disco de gas y polvo con una protoestrella en el centro. El Sol se «encendió» cuando el núcleo central de materia se comprimió tanto que los átomos de hidrógeno se fundieron entre sí. Y alrededor suyo, a lo largo de bandas elípticas, siguiendo un proceso parecido, pero menos intenso gravitacionalmente, se formaron los planetas de lo que llamamos Sistema Solar: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón (aunque este ya no es considerado en la categoría de «planeta»), y los satélites de estos, como la Luna.

Desde esta perspectiva, la Tierra (formada hace unos 4.500 millones de años), al igual que los demás planetas, es algo parecido a un pequeño basurero (o cementerio) cósmico; un lugar en el que se han acumulado restos de la vida de estrellas, no lo suficientemente importantes como para dar lugar a un astro; esto es, aglomerados de elementos en cantidades tan pequeñas que no han podido desencadenar en su interior reacciones termonucleares como las que se producen en las estrellas. Pero al igual que en los basureros también se abre camino la vida, así ocurrió en esta Tierra nuestra, con su diámetro de, aproximadamente, 12.700 kilómetros y un peso de unas 6×1021 (6 seguido de 21 ceros) toneladas. Nosotros somos testigo y demostración de este fenómeno.

Dentro de unos 7.500 millones de años, la zona central del Sol, en la que el

hidrógeno se convierte en helio, aumentará de tamaño a medida que el hidrógeno se vaya consumiendo. Y cuando ese núcleo de helio alcance un tamaño suficiente, el Sol se dilatará hasta convertirse en una estrella de las denominadas gigantes rojas. Se hará tan gigantesca que su diámetro terminará alcanzando la órbita de la Tierra, acabando con ella. Antes de que suceda esto, la superficie terrestre llegará a estar tan caliente como para que el plomo se funda, hiervan los océanos y desaparezca todo rastro de vida. De esta manera, los procesos nucleares que nos dieron la vida acabarán con ella.

PSICO-¿PATOLOGÍA? MORAL DEL FÍSICO NUCLEAR Y DE ALTAS ENERGÍAS

La ciencia la hacen las personas, hombres y mujeres que, al igual que todos los humanos, poseen personalidades que son fruto de esa tan compleja como enigmática interrelación entre naturaleza (genes) y ambiente (la educación que recibimos, los ámbitos en los que nos movemos). ¿Existe alguna característica común, una disposición necesaria para ser científico? No lo creo, salvo, claro está, algún grado de «inteligencia», sea esto lo que sea. También, por supuesto, curiosidad. En cuanto a personalidades, no encuentro demasiados parecidos entre, por ejemplo, Isaac Newton y Michel Faraday, ni entre Agustin-Louis Cauchy y Richard Feynman, o entre Charles Darwin y James Watson, y se trata, en todos los casos, de grandísimos científicos. Sin embargo, tal vez sí se pueda hallar algún rasgo de personalidad que una a los que se dedican a ciertas disciplinas específicas, no, desde luego, en todas.

Pienso en esta posibilidad en dos planos diferentes. El primero, que una especialidad puede exigir, para practicarla con éxito, características muy determinadas, no al alcance de todos. El segundo tiene que ver con la relación entre el individuo y el grupo, cuestión sobre la que ya trató Sigmund Freud en una de sus obras, Massenpsychologie und Ich-Analyse (Psicología de las masas y análisis del yo, 1921). Y no me resisto a citar algo de lo que escribió allí (Freud 1921, 1965 b: 1127): «La oposición entre psicología individual y psicología social o colectiva, que a primera vista puede parecernos muy profunda, pierde gran parte de su significación en cuanto la sometemos a más detenido examen. La psicología individual se concreta, ciertamente, al hombre aislado e investiga los caminos por los que el mismo intenta alcanzar la satisfacción de sus instintos, pero solo muy pocas veces y bajo determinadas condiciones excepcionales le es dado prescindir de las relaciones del individuo con sus semejantes. En la vida anímica individual aparece integrado siempre, efectivamente, “el otro”, como modelo, objeto, auxiliar o adversario, y de este modo, la psicología individual es al mismo tiempo y desde un principio psicología social, en un sentido amplio, pero plenamente justificado».

Una especialidad que cumple uno de los requisitos a los que aludía, y en la que la psicología individual no puede ser ajena a la colectiva, es la física nuclear, y

más específicamente la de altas energías experimental, aunque la teórica no se escape. Hemos visto ya suficientes muestras de que el físico nuclear se ve con frecuencia sometido a ligaduras y tensiones que no existen en gran parte de otras especialidades: algunas consecuencias de sus trabajos (bombas atómicas), y la relación con políticos y militares a que ello ha llevado; la necesidad de entrar en la arena política para asegurar la financiación de sus onerosas investigaciones; manejar o participar —como los físicos experimentales de altas energías— en equipos formados por grupos muy numerosos, incomparablemente más que los que se han dado o dan en cualquier otro campo científico;[235] y en el caso de los teóricos, la tensión por encontrar modelos o teorías que sean capaces de explicar el elevado número de datos experimentales a su disposición, o por adelantarse a los datos prediciendo lo que los experimentales deberían encontrar. Es por esto que considero que merece la pena intentar adentrarse en la psicología del comportamiento de los físicos nucleares y/o de altas energías.

Sé bien que este dominio de la indagación de índole psicológica-psicoanalítica, apenas ha sido explorado. De los pocos que se han aventurado, es obligado recordar a Frank Manuel, a su trascendental, por mucho que sus conclusiones puedan ser debatidas, A Portrait of Isaac Newton. Da idea de sus pretensiones la siguiente cita (Manuel 1968: 2): «En este libro voy a centrarme en Newton el hombre, su persona, su visión del mundo y su estilo de vida. Sin pretender desvelar el secreto del genio de Newton o su misteriosa energía, me propongo describir y analizar aspectos de su conducta, principalmente en situaciones de amor y odio, y explorar las fuerzas que moldearon su carácter. En sus estudios de los grandes, Freud claramente desautorizó cualquier intención de explicar sus extraordinarios poderes. Los ensayos sobre Leonardo y Dostoyevski examinaron episodios críticos de sus historias de vida y buscaron el origen de neurosis, pero se abstuvieron de establecer una fácil relación causal entre las pasiones y fijaciones que a veces les conducen a la distracción y a su creatividad».[236]

Mi intención aquí es aún más limitada, y precavida, que la de Manuel y Freud; simplemente ofreceré unos pocos ejemplos que creo ayudan a entender la personalidad —¿la psicología?— de esos científicos, que su especialidad ha contribuido a reforzar o a crear.

Y en la categoría de físicos experimentales de altas energías, ¿qué mejor ejemplo que Ernest Lawrence, el gran pionero del campo? Pues bien, Emilio Segrè (1993: 266), que le conoció bien, dibujó el siguiente perfil de él: «Lawrence era un individuo intenso, impulsivo, optimista y muy activo, más un hacedor que un

pensador, un líder de hombres de nacimiento. Estaba lleno de contradicciones, que le hacían impredecible. Su personalidad era fundamentalmente generosa y magnánima, pero ocasionalmente podía ser mezquino. Su optimismo y entusiasmo, ingredientes básicos de su éxito, le condujeron, a veces, más allá de donde debería haber ido como científico. Disfrutaba de la vida en su totalidad y obtuvo gran satisfacción de los éxitos científicos de sus asociados, pero también tenía ambiciones infantiles de relacionarse con personas ricas y poderosas. Apenas conozco su actividad política, el lado oscuro de su vida. En su juventud comenzó como un liberal, en la tradición del medioeste de Robert La Follete, como se podría esperar dados sus orígenes familiares; pero terminó como un reaccionario».

Otro caso digno de considerar es el de Robert Oppenheimer (1904-1967), con el que ya nos encontramos en los dos primeros capítulos. Neoyorquino de ascendencia judía, Oppenheimer estudió física y química en Harvard, licenciándose en solo tres años. Una vez graduado se trasladó a Europa, donde permaneció cuatro años, justo en los años en que en el Viejo Continente bullía la física cuántica, estudiando con Rutherford (en Cambridge), Born (en Gotinga), bajo cuya dirección se doctoró en 1927, Ehrenfest (en Leiden) y Pauli (en Zúrich). De regreso a Estados Unidos, Oppenheimer compartió puestos docentes en la Universidad de Berkeley y el Instituto Tecnológico de California. Fue uno de los que más hizo por introducir la física cuántica en Estados Unidos, en donde llegaría a prosperar con una fuerza de la que careció en Europa, exhausta tras sus guerras. En ciencia fue un hombre de su tiempo, pero también lo fue en el plano sociopolítico, en el que sus simpatías se inclinaron, en aquellos años, hacia la izquierda: participó activamente en varios comités para ayudar a la República española durante la Guerra Civil y frecuentó la compañía de organizaciones comunistas (su hermano Frank fue durante algún tiempo miembro del partido, y él se casó con la viuda de un comunista que murió mientras combatía en España). Era inteligente, brillante, culto, atractivo, rico, además de altanero y orgulloso. En Berkeley, en donde Ernest Lawrence estaba creando la física de altas energías, con sus cada vez más grandes aceleradores de partículas, sus habilidades como teórico resultaban indispensables. No es sorprendente, por tanto, que el general Leslie Groves —que no ignoraba las relaciones que Oppenheimer había mantenido con organizaciones de izquierdas— lo eligiese para dirigir el laboratorio de Los Álamos, la última pieza del Proyecto Manhattan. Y tuvo éxito, aunque para ello fueron necesarios no solo sus conocimientos científicos, sino también una gran capacidad organizativa y habilidad para manejar a lo que seguramente constituyó la mayor concentración

de la historia de prime donne científicas (por ejemplo Feynman, Bethe, Fermi, Teller, Segré, Weisskopf, Alvarez, McMillan, Rabi, Tolman, Lawrence, Compton, Bohr —ocasionalmente—, Condon, Ramsey o Ulam). En este sentido fue un pionero de lo que después llegaría a ser frecuente: científicos eminentes que, a partir de un cierto momento, se convierten en organizadores, en «empresarios de la ciencia», con las inevitables consecuencias que ello conlleva en sus propias investigaciones. Un somero vistazo a la lista de publicaciones de Oppenheimer muestra que desde 1926 hasta 1942 escribió 64 artículos, ninguno entre ese último año y 1945, y únicamente 5 a partir de 1946. La «Gran Ciencia», la ciencia que reúne en proyectos de investigación centenares de científicos y técnicos y que requiere de enormes recursos económicos, la ciencia que cuenta entre sus elementos, además de los puramente científicos otros relacionados con la política, la industria y la economía, necesita de Oppenheimers.

Sabemos muy bien que el Laboratorio de Los Álamos cumplió con lo que se esperaba de él, fabricando las bombas atómicas que estallaron sobre Hiroshima y Nagasaki. Y también conocemos las reacciones de algunos de los que participaron en aquel proyecto tras el lanzamiento de las bombas, o poco antes: Einstein, Szilard y Bohr entre ellos, manifestaron en 1945 su oposición a que se hubiese utilizado la bomba atómica contra Japón, y no olvidemos a James Franck, que mostró su preocupación antes incluso de que se lanzasen las bombas atómicas. Lawrence, Compton y Oppenheimer, los más influyentes de los físicos que habían ayudado a construir la bomba, apoyaron públicamente su lanzamiento. Sin embargo, el tiempo socavó algunas conciencias, la de Oppenheimer, más reflexivo que la mayoría, que en una conferencia (Arthur D. Little Memorial Lecture) que pronunció en 1947 declaraba que «los físicos habían conocido el pecado» y que ello representaba «un conocimiento que no podían perder» (Oppenheimer 1948: 66).[237] Lawrence, menos sensible que su colega, contestaba que él «era un físico y que no tenía ningún conocimiento que perder en el que la física [le hubiera] causado conocer el pecado».[238]

Es fácil imaginar las tensiones emocionales que debieron existir en el sensible y en ocasiones contradictorio espíritu de Oppenheimer, que sin duda exacerbó la audiencia —aunque más bien se la podría denominar «juicio»— de seguridad que sufrió y como consecuencia de la cual en diciembre de 1953 perdió el permiso a acceder a materias reservadas en el campo nuclear.[239]

El ejemplo final del que voy a tratar es el del físico soviético Andrei Sajarov

(1921-1989), que después de contribuir decisivamente a que la Unión Soviética dispusiese de bomba de hidrógeno, terminó siendo un notable opositor al régimen comunista y Premio Nobel de la Paz en 1975.

En sus memorias, Sajarov (1991: 148-149) recordó cómo había comenzado a trabajar en este campo:

En 1948, nadie me preguntó si quería o no tomar parte en este trabajo [contribuir a la construcción de una bomba de hidrógeno]. No tuve oportunidad de elegir, pero me entregué totalmente, con gran concentración, una absorción total y mucha energía, por propia voluntad. Ahora que han pasado tantos años, me gustaría explicar los motivos de mi dedicación, a mí mismo sin ir más lejos. Una de las razones de ello (aunque no la principal) fue la posibilidad de hacer «física superior» (el comentario de Fermi sobre el programa de la bomba atómica). Mucha gente pensó que su comentario era cínico, pero el cinismo normalmente presupone la duplicidad, mientras que yo creo que Fermi era completamente sincero, aunque bien pudo haber estado guardándose la auténtica cuestión. No se debe olvidar que el comentario completo de Fermi, «Después de todo, es física superior», indica que hay otro lado de la cuestión.

Que la fusión termonuclear era para Sajarov «física superior» queda claro en sus siguientes palabras (Sajarov 1991: 1409-150): «La física de las explosiones atómicas y termonucleares es un verdadero paraíso para los teóricos [...] Una reacción termonuclear —la misteriosa fuente de energía del Sol y de las estrellas, el sustento de la vida en la Tierra, pero al mismo tiempo un potencial instrumento de su destrucción— estaba a mi alcance. Estaba tomando forma en mi mesa [...] En aquellos momentos lo más importante para mí, y creo que también para Tamm y los demás miembros del grupo, era la convicción de que nuestro trabajo era esencial». Por supuesto, se daba cuenta de que «las armas que se estaban construyendo eran de naturaleza inhumana y aterradora. Pero la guerra que acabábamos de pasar también había sido un ejercicio de barbarie; y a pesar de que yo no había luchado en ese conflicto, me consideraba a mí mismo un soldado en esa nueva guerra científica».

En el bando contrario, el estadounidense, también se produjeron sentimientos

parecidos. Veamos en este sentido lo que, refiriéndose a sus trabajos en el Proyecto Manhattan, escribió en su autobiografía Victor Weisskopf (1991:127-128), el muy distinguido físico de origen austriaco que, como tuvimos ocasión de comprobar, realizó importantes contribuciones a la electrodinámica cuántica, tanto en Alemania como en Suiza y Dinamarca (trabajando con, respectivamente, Pauli y Bohr), antes de instalarse, en 1937, en Estados Unidos, país en el que se integró plenamente (durante un tiempo, fue director general del CERN):

Como es habitual en los primeros estadios de la investigación científica, según progresa la investigación, van surgiendo más problemas. La interacción de neutrones con la materia era más variada y complicada de lo que habíamos supuesto. En un momento casi concluimos que el artilugio [la bomba atómica] nunca explotaría porque ciertas sustancias absorbían demasiados neutrones. Al principio no sabíamos cómo reunir el uranio o el plutonio lo suficientemente deprisa para evitar que la explosión se iniciase en un momento en el que no produciría suficiente potencia. En esta corta exposición sería imposible mencionar todos los escollos a los que nos enfrentábamos. De cualquier manera, en aquel punto no estábamos seguros de que se pudiera construir una bomba y algunos de nosotros a veces pensábamos que nunca sería posible.

Las reacciones psicológicas a estas dificultades eran variadas. Algunos de nosotros, incluyéndome yo mismo, secretamente deseábamos que las dificultades fueran insuperables. Todos éramos conscientes de que la bomba que estábamos intentado desarrollar sería un instrumento terrible de destrucción sin el cual el mundo estaría mejor. Y si era imposible para cualquiera desarrollar una bomba nuclear, no existiría ningún peligro de que los nazis dispusieran de una.

Entonces, de manera imperceptible, se produjo entre nosotros un cambio de actitud. Según nos íbamos involucrando más profundamente en el trabajo del día a día de nuestra tarea colectiva, cualquier reserva que hubiéramos tenido al principio comenzó a desvanecerse, y lentamente el gran propósito se convirtió en una irresistible fuerza. Teníamos que conseguir lo que habíamos planeado hacer.

La lectura de las palabras de Sajarov y Weisskopf no ofrece demasiadas dudas.

Nos revelan el atractivo que para los científicos tiene la investigación científica, un atractivo que con frecuencia pasa por encima de, prácticamente, cualquier otra consideración. Incluso para aquellos que, como terminó siendo el caso de Sajarov, poseen o desarrollan sensibilidad moral y valor cívico (Weisskopf tampoco carecía de semejantes valores). Precisamente por esa dualidad, o acaso mejor, esquizofrenia, moral me siento tentado a considerarlo como comportamiento patológico. La segunda mitad del siglo XX fue testigo de numerosos ejemplos de físicos en este mismo sentido.

La biografía de Sajarov también permite abordar un apartado que incidió en el comportamiento de algunos físicos nucleares: su relación con el poder político (o militar), su, mejor dicho y aunque no falten los que creyesen lo contrario: su subordinación al poder.

Esa subordinación aparece con dramática claridad en dos momentos de las Memorias de Sajarov. El primero se refiere a algo que sucedió después de la prueba nuclear (de una bomba de hidrógeno) que se realizó el 22 de noviembre de 1955 en un lugar de Siberia. La prueba tuvo éxito, aunque la onda de choque produjo deterioros más graves de los que los científicos habían supuesto. «Zeldovich se me echó encima, gritando: “¡Ha funcionado! ¡Ha funcionado! ¡Todo ha funcionado!” Entonces me rodeó con sus brazos. Estábamos eufóricos», comentaba Sajarov (1991: 277). Después de la prueba, se organizó una fiesta en la casa del mariscal Mitrofan Nedelin, director militar de la prueba. Y en este punto, escribió Sajarov (1991: 281):

Cuando nos habíamos sentado todos, se sirvió el brandy. Los guardaespaldas permanecían de pie junto a la pared. Nedelin me hizo un gesto, invitándome a hacer el primer brindis. Con el vaso en la mano, me levanté y dije algo así: «Ojalá que nuestros ingenios tengan siempre el mismo éxito que hoy, pero que sea siempre sobre campos de prueba y no sobre ciudades».

La mesa se quedó en silencio como si yo hubiese dicho algo fuera de lugar, Nedelin sonrió forzadamente. Entonces se levantó con el vaso en la mano y dijo: «Déjenme contar una parábola. Un hombre viejo, que solo llevaba puesta una camisa, estaba rezando ante un icono: “Guíame y enduréceme. Guíame y enduréceme”. Su esposa, que ya estaba tumbada en la cama, le dijo: “Solo reza para que se te ponga dura, carcamal, que de guiarla dentro ya me encargo yo”.

Bebamos para endurecernos».

Todo mi cuerpo se agarrotó, creo que me puse pálido, cuando lo normal era que me sonrojara. Durante unos segundos nadie habló y, de repente, todo el mundo rompió a hablar en voz alta. Tomé mi brandy en silencio y no volví a abrir la boca durante toda la noche. Han pasado muchos años pero todavía tengo una sensación como si me hubiesen azotado con un látigo. No se trataba de que hubiesen herido mis sentimientos: normalmente no me suelo ofender con facilidad y menos con un chiste. Pero la parábola de Nedelin no era un chiste. Quería aplastar mis sentimientos pacifistas y ponernos en nuestro sitio a mí y a cualquiera que compartiese mis ideas.

El aspecto principal de esta historia (medio impúdica, medio irreverente, lo que aumentaba su efecto desagradable) quedaba suficientemente claro. Nosotros, los inventores, científicos, ingenieros y especialistas, habíamos creado un arma terrible, el arma más terrible de la historia humana, pero su uso quedaba completamente fuera de nuestro control. La gente de los puestos más altos del Partido y de la jerarquía militar tomaría las decisiones. Desde luego, yo ya sabía esto, no era tan pueril. Pero comprender algo de un modo abstracto es diferente a sentirlo en nuestras propias carnes, como la realidad de la vida y la muerte.

Al leer esta última línea, tal vez algún lector recuerde —crea en ello o no— lo que Freud, que teorizó que la dualidad de la naturaleza humana surgió de dos instintos, Eros, el instinto de la vida, y Thanatos, el de la muerte, escribió en uno de sus libros, El malestar de la cultura (Freud 1930, 1965 c: 45-46):

En todo lo que sigue adoptaré, pues, el punto de vista de que la tendencia agresiva es una disposición innata y autónoma del ser humano; además, retomo ahora mi afirmación de que aquella constituye el mayor obstáculo con que tropieza la cultura. En el curso de esta investigación se nos impuso alguna vez la intuición de que la cultura sería un proceso particular que se desarrolla sobre la humanidad, y aún ahora nos subyuga esta idea. Añadiremos que se trata de un proceso puesto al servicio de Eros, destinado a condensar en una unidad vasta, en la humanidad, a los individuos aislados, luego a las familias, las tribus, los pueblos y las naciones. No sabemos por qué es preciso que sea así: aceptamos

que es, simplemente, la obra del Eros. Estas masas humanas han de ser vinculadas libidinalmente, pues ni la necesidad por sí sola ni las ventajas de la comunidad de trabajo bastarían para mantenerlas unidas. Pero el natural instinto humano de agresión, la hostilidad de uno contra todos y de todos contra uno, se opone a este designio de la cultura. Dicho instinto de agresión es el descendiente y principal representante del instinto de muerte, que hemos hallado junto a Eros y que con él comparte la dominación del mundo. Ahora, creo, el sentido de la evolución cultural ya no nos resultará impenetrable; por fuerza debe presentarnos la lucha entre Eros y muerte, instinto de vida e instinto de destrucción, tal como se lleva a cabo en la especie humana. Esta lucha es, en suma, el contenido esencial de la misma, y por ello la evolución cultural puede ser definida brevemente como la lucha de la especie humana por la vida.

Continuando con Sajarov, parece que no aprendió demasiado bien la lección de Nedelin. En 1961, dentro del contexto de las políticas que seguían las potencias nucleares, Nikita Kruschev decidió que la manera más eficaz de enfrentarse a Estados Unidos era poner fin a la moratoria informal que estaban siguiendo entonces la Unión Soviética, Estados Unidos y Gran Bretaña, que no habían detonado ninguna bomba desde 1959 (sí lo había hecho Francia, que realizó su primera prueba nuclear en marzo de 1960). Una vez tomada la decisión, en julio de 1961, Kruschev organizó en el Kremlin una «Reunión de líderes del Partido y del Gobierno con científicos atómicos» para informar sobre el particular. He aquí cómo describió Sajarov (1991: 309-312) en sus memorias lo que sucedió entonces:

Kruschev anunció inmediatamente su decisión: las pruebas nucleares se reanudarían en el otoño, porque la situación internacional se había deteriorado y porque la URSS se había quedado rezagada respecto a EE.UU. en pruebas... Tendríamos que reforzar nuestro poderío nuclear y demostrar a los «imperialistas lo que éramos capaces de hacer».

Tal como podía esperarse, no había planes para debatir la decisión. Después de la alocución de Kruschev, se entendía que hablarían las personas clave durante unos diez o quince minutos, cada una sobre sus trabajos en curso. Cuando me llegó el turno, hacia la mitad de la lista de ponentes, hablé rápidamente de

nuestra investigación en temas de armamento y luego expuse mi opinión de que poco teníamos que ganar con la reanudación de las pruebas en este punto de nuestro programa. Mi observación se anotó, pero no provocó respuesta inmediata.

Pero al volver a su asiento, Sajarov escribió una nota para Kruschev en la que señalaba que estaba «convencido de que la reanudación de las pruebas en estos momentos solamente beneficiaría a EE.UU. Espoleados por el éxito de nuestros Sputniks pueden utilizar las pruebas para mejorar sus ingenios. Nos han subestimado en tiempos pasados, aunque nuestro programa ha estado basado en una evaluación realista de la situación... ¿No piensa usted que unas nuevas pruebas pondrían en serio peligro las negociaciones de prohibición de las pruebas, la causa del desarme y la paz mundial?».

«Kruschev», continuaba explicando Sajarov, «leyó la nota, miró hacia mí y la guardó en el bolsillo interior de su chaqueta, después de doblarla en cuatro. Cuando se acabaron las ponencias, se levantó, dio las gracias a los oradores y luego añadió: “Hagamos todos una pausa. En nombre del Presidium del Comité Central, invito a todos nuestros huéspedes a cenar con nosotros dentro de una hora”».

Y en la cena se produjo el suceso que me importa resaltar. Después de que todos los participantes, miembros del Presidium y científicos, ocuparan sus puestos, «tomó una copa de vino como si fuera a proponer un brindis. Pero antes al contrario, volvió a dejar la copa sobre la mesa y empezó a hablar de mi nota: reposadamente al principio, pero luego con una creciente agitación, enrojecido el semblante y tensa la voz». Habló durante media hora o más y esto es lo que Sajarov recordó de sus palabras:

Aquí tengo una nota que he recibido del académico Sajarov [en la que me dice] que no necesitamos las pruebas. Pero yo tengo un documento informativo que me indica el número de pruebas que hemos llevado a cabo nosotros y el número de pruebas que han llevado a cabo los norteamericanos. ¿Puede demostrar realmente Sajarov que con menos pruebas hemos conseguido más información valiosa que los norteamericanos? ¿Son ellos más torpes que nosotros? No hay

forma de que yo conozca todos los puntos clave. Pero el número de pruebas es lo que más importa. ¿Cómo se pueden desarrollar nuevas tecnologías sin pruebas?

Hasta aquí, todo es más o menos razonable, salvo el exabrupto que significa que Kruschev utilizase una cena formal para criticar las opiniones de Sajarov. Pero lo importante para mis propósitos llegó con lo que dijo a continuación:

Pero Sajarov va todavía más lejos. Ha ido más allá de la ciencia para penetrar en la política. Y aquí está metiendo las narices donde no le corresponde. Se puede ser un buen científico sin entender ni una palabra de política [...]

Deje la política para nosotros, que somos especialistas en ella. Haga usted sus bombas y pruébelas y no interferiremos en su trabajo; antes al contrario, le ayudaremos. Pero recuerde que tenemos que dirigir nuestra política desde una posición de fuerza. No lo pregonamos a los cuatro vientos, pero así es como es. No puede haber otra política. Nuestros oponentes no comprenden otro lenguaje. Mire, nosotros ayudamos a que eligieran a Kennedy el año pasado. Luego nos reunimos con él en Viena, reunión que pudo haber sido el punto de inflexión. Pero, ¿qué nos dice? «No me exijan demasiado. No me pongan en un aprieto. Si hago demasiadas concesiones me destituirán». ¡Vaya individuo! Viene a una reunión, pero no puede actuar. ¿Para qué demonios necesitamos a un tipo como ese? ¿Por qué vamos a malgastar el tiempo en hablar con él? Sajarov, no trate de decirnos lo que hemos de hacer o cómo hemos de comportarnos. De sobra sabemos lo que es la política. ¡Un alfeñique sería yo y no el Presidente del Consejo de Ministros si escuchara a personas como Sajarov!

«Ha metido las narices donde no le corresponde». «La política es para los políticos», no para los científicos. Manifestaciones como estas son ilustrativas. Cierto es que lo son especialmente en un régimen totalitario como era el soviético, pero no se dan únicamente en sistemas no democráticos: pueden aparecer en cualquier régimen, solo que en las democracias existen mecanismos que atenúan la tendencia de los políticos (y de los militares) a creerse los únicos depositarios de los intereses nacionales. Recordemos también en este punto otra manifestación del gran teórico del poder que fue Bertrand de Jouvenel (1998,

223): «El Poder es autoridad y tiende a tener más autoridad. Es Poder y tiende a ser más Poder».

II

ENTRELAZAMIENTO Y MULTIUNIVERSOS

EL ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO

Las teorías físicas de las que he estado tratando en las secciones precedentes son teorías cuánticas, pero el mundo de la física cuántica no se restringe a ellas, y constituiría un grave error no referirse a otras novedades que surgieron en ese mundo durante la segunda mitad del siglo XX. Una de esas novedades, muy importante y sorprendente, que en realidad subyacía en contribuciones realizadas a la ciencia en la primera mitad de la centuria, es la del entrelazamiento (entanglement), o la no localidad.

El fin de la ciencia es suministrar sistemas teóricos que permitan relacionar cuantos más fenómenos naturales mejor y que estos sistemas tengan capacidad predictiva. A esto le llamamos «explicar la naturaleza». Ahora bien, «explicar» no quiere decir encontrar respuestas que nos resulten familiares, que no violenten nuestras categorías explicativas más comunes: ¿por qué la naturaleza iba a seguir tales pautas? Ya vimos que la física cuántica muestra con especial virulencia que la realidad nos puede resultar profundamente contraintuitiva. Si este rasgo estaba claro desde que en 1925-1926 se contó con la mecánica cuántica, ahora lo está aún más. Veamos a qué me refiero.

En 1935, Albert Einstein, junto a dos colaboradores suyos, Boris Podolsky y Nathan Rosen, publicaron un artículo en el que argumentaban que la mecánica cuántica no podía ser una teoría completa, que era necesario introducir nuevas variables, «variables ocultas». En mi opinión, e independientemente de lo que el futuro tuviese que decir sobre las ideas contenidas en este trabajo, sus primeros párrafos son memorables, ya que transcienden la mera discusión física, adentrándose en las profundidades de la filosofía y la metodología de la ciencia. [240] Los citaré (Einstein, Podolsky y Rosen 1935: 777):

Cualquier consideración seria sobre una teoría física debe tomar en cuenta la distinción entre la realidad objetiva, que es independiente de cualquier teoría, y los conceptos físicos con los que opera la teoría. Estos conceptos tienen por objetivo corresponderse con la realidad objetiva, y por medio de ellos nos imaginamos esta realidad.

Al intentar juzgar el éxito de una teoría física, podemos hacernos dos preguntas: (1) «¿Es correcta la teoría?», y (2) «¿Es completa la descripción dada por la teoría?». Es solamente en el caso de que se pueda dar respuesta positiva a ambas preguntas, que se puede decir que los conceptos de la teoría son satisfactorios. La corrección de la teoría se juzga por el grado de acuerdo entre las conclusiones de la teoría y la experiencia humana. En la física, esta experiencia, que solo nos permite realizar inferencias acerca de la realidad, toma la forma de experimento y medida. Es la segunda pregunta la que deseamos considerar aquí, aplicándola a la mecánica cuántica.

Cualquiera que sea el significado que se asigne al término completo, parece que debe ser necesario el siguiente requisito para una teoría completa: todo elemento de la realidad física debe tener una contrapartida en la teoría física. Denominaremos a esta, la condición de completitud.

No se puede determinar los elementos de la realidad física mediante consideraciones filosóficas a priori, sino que se deben encontrar recurriendo a los resultados de experimentos y medidas. Para nuestros propósitos, no es, sin embargo, necesaria una definición totalizadora de realidad. Nos quedamos satisfechos con el siguiente criterio, que consideramos razonable. Si, sin perturbar el sistema de ninguna manera, podemos predecir con seguridad (esto es, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física que corresponde a esta cantidad física.

Nunca antes, que yo sepa, un físico se había aventurado a definir lo que se debe entender por «realidad». Era lo que se podría denominar, «suposiciones no cuestionadas y asumidas implícitamente». La física cuántica demostraría que se trataba de un concepto complejo y desde luego cuestionable.

El texto de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) se refiere a la relación lógica entre dos afirmaciones, la de que la descripción de la realidad en mecánica cuántica mediante una función de onda es incompleta, y el que magnitudes incompatibles (dos magnitudes físicas cuyos operadores no conmutan, como la posición y el momento) no pueden tener un valor real, perfectamente definido, de manera simultánea (recuérdese que según el principio de incertidumbre de Heisenberg, no se puede determinar simultáneamente posición y momento). Y concluían que solo se puede mantener una de estas dos afirmaciones, la que sostiene que la

descripción mecano-cuántica de la realidad física mediante la función de onda es incompleta.

EPR demostraban que la suposición de que la función de onda contiene una descripción completa de la realidad física de un sistema, junto con el criterio de realidad que introdujeron, conduce a una contradicción. Para ello proponían un experimento mental, con dos sistemas, cuyos estados iniciales son conocidos, que interaccionan durante un cierto tiempo. Su argumentación se basaba en que se puede conocer el estado del sistema conjunto en cualquier instante posterior, pero no el estado de cada sistema por separado, porque la realización de una medición en uno de los sistemas produce una «reducción del paquete de ondas» que conduce a que el segundo sistema se deje en un estado con dos funciones de onda distintas, de donde concluían que la teoría cuántica no es completa. Prosiguiendo con el experimento mental, demostraban que si la función de onda proporciona una descripción completa, y si las dos funciones de onda se corresponden a dos magnitudes físicas cuyos operadores no conmutan, el experimento conduce a que las dos magnitudes se pueden medir en cualquiera de las partículas sin perturbarlas; esto es, que eran elementos de la realidad física

Una posibilidad es que existiesen variables, ocultas, que la formulación canónica de la mecánica cuántica no hubiera considerado. No obstante, Einstein, Podolsky y Rosen (1935: 780) finalizaban su artículo con cautela:

Mientras que hemos demostrado que la función de onda no proporciona una descripción completa de la realidad física, dejamos abierta la cuestión de si existe o no semejante descripción. Creemos, sin embargo, que tal teoría es posible.

Nadie entendió mejor el significado profundo de este artículo, al que también se le conoce como el de la «paradoja EPR», que Erwin Schrödinger, el creador de la mecánica cuántica ondulatoria. El mismo año en que apareció el trabajo de EPR, Schrödinger (1935) publicó, en tres partes, un artículo extraordinario, de los mejores que escribió en toda su carrera, en la revista Die Naturwissenschaften titulado «La situación actual de la mecánica cuántica», más conocido porque en él se presentaba el experimento ideal conocido como el

«gato de Schrödinger». Aunque no es esa parte de su artículo la que más me interesa destacar aquí, obviamente no la puedo dejar de lado —es, en cualquier caso, muy importante—, así que citaré la explicación de Schrödinger (1935: 812):

Se mete un gato en una cámara de acero, junto con el siguiente dispositivo diabólico (que debe asegurarse contra cualquier interferencia directa del gato): en un contador Geiger existe un pequeño trozo de sustancia radiactiva, tan pequeña que acaso en el curso de una hora uno de los átomos se desintegrará, pero también, con igual probabilidad, tal vez ninguno lo hará; si sucede esto [que se produzca la desintegración], el tubo del contador genera una descarga y mediante un relé se pone en acción un martillo que rompe un pequeño frasco de ácido cianhídrico. Si hemos dejado el sistema completo durante una hora, sin intervenir en él de ninguna manera, podríamos decir que el gato todavía vive si en ese intervalo no se ha desintegrado ningún átomo. El primer átomo que se hubiera desintegrado lo habría envenenado. La función Ψ del sistema completo expresaría esto al estar compuesta por el gato muerto y el gato vivo (perdón por la expresión) mezclados o esparcidos en partes iguales.

Lo que Schrödinger estaba señalando es el papel que desempeña la superposición de estados en la mecánica cuántica. El colapso de la función de onda de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica decía que cuando el observador (que obedece a las leyes de la física clásica, algo, por cierto, no fácil de aceptar, en la medida que implica una mezcla poco natural entre física clásica y cuántica) realiza una medida, esta se concreta, con una cierta probabilidad, en un estado de todos los posibles que alberga la función de onda completa original. Pero, ¿qué sucede mientras tanto, cuando no se ha hecho la medida? Parece que la respuesta inmediata no plantea problemas cuando se trata de átomos, pero ¿y cuando, como ponía en evidencia Schrödinger, se trata de objetos macroscópicos? Volveré a esta cuestión más adelante. Ahora pasemos al significado del artículo de EPR, tal y como lo puso de manifiesto Schrödinger en su artículo de 1935.

Es en este artículo donde Schrödinger denominó la propiedad que EPR habían puesto de manifiesto, como «Verschränkung» («entrelazamiento; Schrödinger

1935: 827): «Cualquier entrelazamiento de predicciones [“Verschränkung der Voraussagen”] que tenga lugar obviamente solo puede remontarse al hecho de que en un momento anterior los dos cuerpos formaban en un sentido verdadero un sistema, esto es, que estuvieron interaccionados, y dejaron atrás trazas el uno en el otro. Si dos cuerpos separados, cada uno de ellos conocidos en sí mismo de forma máxima, entran en una situación en la que se influyen entre sí, y se separan de nuevo, entonces tiene lugar de manera regular lo que acabo de llamar entrelazamiento [Verschränkung] de nuestro conocimiento de los dos cuerpos». Con mayor claridad, más adelante (tercera entrega, sección 11) explicaba la característica del entrelazamiento cuántico (Schrödinger 1935: 844):

Supongamos que dos cuerpos, A y B, se han entrelazado durante una interacción transitoria. Dejemos ahora que los cuerpos se separen de nuevo. Entonces puedo tomar uno de ellos, digamos B, y mediante medidas sucesivas [...] obtener un conocimiento máximo de él. Sostengo: que tan pronto como logre esto, y no antes, entonces, primero, el entrelazamiento se habrá deshecho inmediatamente y, segundo, también habré obtenido el máximo conocimiento de A a través de las medidas sobre B.

El entrelazamiento que explícitamente sacaba a la palestra Schrödinger no es sino una manifestación de la no localidad de la teoría cuántica. Se trata, evidentemente, de una característica extremadamente contraintuitiva (¡una más en el mundo cuántico!), ya que viene a decir que elementos que habían formado parte de un sistema cuántico común, continuaban «informados sobre sus devenires» con independencia de cuánto tiempo hubiese pasado y de cuánta distancia les hubiese separado. Parecía como si las viejas acciones a distancia newtonianas reviviesen —de hecho así ha sido—, con todas las consecuencias y problemas que esto conlleva, notablemente su acuerdo o no con el límite de propagación de información que establece la teoría de la relatividad especial. Y Einstein, por cierto, se dio perfecta cuenta de este problema; así en una carta que escribió a Max Born el 3 de marzo de 1947, señalaba (Born 2005: 155):

No puedo alterar mi actitud sobre la física de manera que tú la consideres

razonable. Admito, por supuesto, que existe un considerable grado de validez en el enfoque estadístico, que tú fuiste el primero en reconocer claramente que era necesario dado el esquema del formalismo existente. No puedo creer seriamente en él porque la teoría no se puede reconciliar con la idea de que la física debería representar una realidad en el tiempo y el espacio, libre de fantasmagóricas [spukhafte Fernwirkung] acciones a distancia.

Sin embargo, durante bastante tiempo ni el artículo de EPR ni el de Schrödinger, apenas atrajeron atención, salvo por la «paradoja del gato». La excepción más importante fue David Bohm, a quien mencioné brevemente en el capítulo primero.[241] A comienzos de la década de 1950 (Bohm 1952 a, b) produjo una versión de la mecánica cuántica de variables ocultas (que definía [Bohm 1952 a: 166] como aquellas que «en principio determinan el comportamiento preciso de un sistema individual pero que en la práctica son promedios sobre los tipos de medidas que se pueden realizar»). En su trabajo sostenía (Bohm 1952 b: 166), que «conduce precisamente a los mismos resultados, para todos los procesos físicos, que la interpretación habitual. Sin embargo, la interpretación que se sugiere proporciona un marco conceptual más amplio que la interpretación habitual, porque hace posible una descripción precisa y continua de todos los procesos, incluso en el nivel cuántico». Nótese lo de «continua», que significa que se trataba de una teoría local. En 1957, mientras trabajaba en Haifa, Bohm y Yakir Aharonov (1957) desarrollaron una versión no local (esto es, que tenía muy en cuenta el entrelazamiento) más sólida, también de variables ocultas. Básicamente, era una reformulación más sencilla del escenario EPR, en la que sustituían la base posición-momento por una centrada en el espín. El problema para Bohm y para todos los que creían en posibles teorías cuánticas de variables ocultas, era que, como vimos en el capítulo 1, en su libro de 1932, Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, John von Neumann había demostrado un teorema que negaba la posibilidad de teorías cuánticas de variables ocultas. Y ese resultado continuaba siendo aceptado, de manera que cuando Bohm construyó una de esas teorías «prohibidas» pocos le prestaron atención.

Entre los escasos físicos que repararon en la reformulación del trabajo de Einstein-Podolsky-Rosen que había producido Bohm, se encuentra John Stewart Bell (1928-1990), un personaje esencial en la clarificación de las cuestiones que Einstein y Schrödinger sacaron a la luz.

Natural de Belfast, de origen humilde en lo económico (lo que no impedía que su familia tuviese en muy buena consideración el valor de la educación), Bell llegó a graduarse en Física siguiendo un camino más indirecto y difícil que la mayoría de los que se terminan dedicando a esta disciplina: estudió en la Technical High School de Belfast, tras lo cual trabajó como ayudante técnico junior en el Departamento de Física de la Queen's University de Belfast; allí reconocieron su talento y después de trabajar un año como técnico, pasó a ser estudiante, graduándose en 1948 en Física experimental, y el año siguiente en Física matemática.[242] Entre 1949 y 1960, trabajó en Inglaterra, la mayor parte del tiempo en el Centro de Investigación Atómica de Harwell, en física nuclear y cuestiones relacionadas con aceleradores. En 1953-1954, con permiso de ausencia de Harwell, realizó estudios graduados en la Universidad de Birmingham bajo la dirección de Paul Matthews y Rudolf Peierls. Fue entonces cuando se familiarizó con la situación en la física teórica y preparó su tesis doctoral que defendió en 1956, después de haber regresado a Harwell; incluía una demostración del teorema CPT, pero perdió la prioridad de la demostración porque Gerhard Lüders (1954) publicó otra prueba antes. Insatisfecho con el tipo de trabajo que realizaba en Harwell, en 1960 Bell —y su esposa, también física — abandonaron sus puestos permanentes allí y aceptaron puestos temporales en el CERN, él en la División de Física Teórica y ella en el Grupo de Investigación de Aceleradores. En el CERN pronto comenzó a dedicar parte de su tiempo libre a los fundamentos de la mecánica cuántica (en un documento escribió que se dedicaba a la «ingeniería cuántica»), dedicación que, junto a la libertad que le proporcionó el año sabático, 1963-1964, que pasó en Estados Unidos (SLAC, Universidades de Wisconsin y Brandeis), dio origen a dos artículos absolutamente fundamentales. Escribió ambos en 1964, aunque la publicación de uno de ellos se demoró hasta 1966. Se titularon «Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen» (Bell 1964) y «Sobre el problema de las variables ocultas en la mecánica cuántica» (Bell 1966).

En el segundo —el primero conceptualmente y probablemente también el primero en ser escrito—, Bell demostró que el teorema de Von Neumann tenía fallos, y explicaba cómo Bohm había podido evitarlos construyendo su modelo. La introducción del artículo, que reproduzco parcialmente a continuación, explica con claridad las intenciones y resultados de Bell (1952, 1990: 25-26):

El conocimiento del estado cuántico de un sistema implica, en general, solo

restricciones estadísticas sobre los resultados de las medidas. Parece interesante preguntarse si este elemento estadístico debe considerarse que surge, como en la mecánica estadística clásica, porque los estados en cuestión son promedios sobre estados mejor definidos en los que los resultados estarían completamente determinados de modo individual. Estos hipotéticos estados «sin dispersión» vendrían especificados no solo por el vector estado mecano-cuántico sino además por «variables ocultas» adicionales; «ocultas» porque si pudieran prepararse estados con valores prescritos de esas variables, entonces la mecánica cuántica sería inadecuada a nivel observacional.

Ha sido objeto de debate si esta cuestión es verdaderamente interesante. El presente artículo no contribuye a ese debate. Está dirigido a los que encuentran interesante dicha cuestión y más particularmente a aquellos, de entre ellos, que piensan que «la cuestión concerniente a la existencia de tales variables ocultas recibió una respuesta pronta y bastante decisiva en base a la prueba de Von Neumann de la imposibilidad matemática de tales variables en la teoría cuántica». Se intentará clarificar lo que realmente demostraron Von Neumann y sus continuadores [...] Se hará hincapié en que esos análisis dejan intacta la cuestión real. Se verá, de hecho, que esas demostraciones requieren de los hipotéticos estados sin dispersión, no solo de que conjuntos apropiados de ellos hayan de tener todas las propiedades medibles de los estados cuánticos, sino además algunas otras propiedades. Estas exigencias adicionales parecen razonables cuando se identifican vagamente con propiedades de sistemas aislados. Se ve que no lo son cuando se recuerda con Bohr «la imposibilidad de cualquier distinción neta entre el comportamiento de los objetos atómicos y la interacción con los instrumentos de medida que sirven para definir las condiciones bajo las cuales aparecen los fenómenos».

La conciencia de que la demostración de Von Neumann es de relevancia limitada ha ido ganando terreno desde el trabajo de Bohm de 1952. Sin embargo, se halla lejos de ser universal. Además, quien escribe no ha encontrado en la literatura ningún análisis adecuado de qué era incorrecto en dicha demostración. Como todos los autores de artículos de revisión no hechos por encargo, él cree poder hacer una nueva exposición del tema con una claridad y simplicidad tales que todas las discusiones previas quedarán eclipsadas.

En el primer artículo, «Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen», Bell

(1964) demostró que existían unas relaciones (desigualdades) que se podían emplear para decidir experimentalmente qué tipo de teoría era correcta, si una «completa» (que incluyese unas variables «ocultas» para la formulación cuántica) que obedeciese a los requisitos que Einstein, Podolsky y Rosen habían planteado en 1935, o la mecánica cuántica tradicional. También en este caso, reproduciré parte de la introducción de otro artículo posterior (Bell 1964, 1990: 41-42):

La paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen se propuso como un argumento de que la mecánica cuántica no podía ser una teoría completa, sino que debía ser suplida con variables adicionales. Estas variables adicionales restaurarían la causalidad y localidad en la teoría. En esta nota se formulará matemáticamente esa idea y se mostrará que es incompatible con las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica. Es el requisito de localidad, o más precisamente el que el resultado de una medida sobre el sistema no se vea afectado por operaciones sobre un sistema distante con el cual haya interaccionado en el pasado, lo que crea la dificultad esencial. Ha habido intentos de demostrar que incluso sin tal requisito de separabilidad o localidad no es posible ninguna interpretación de «variables ocultas». Se han examinado estos intentos en otro lugar [Bell 1966] y han sido encontrados defectuosos. Más aún, ha sido explícitamente construida una interpretación de variables ocultas de la teoría cuántica elemental. Esta interpretación particular tiene ciertamente una marcada estructura no-local. De acuerdo con el resultado que se probará aquí, esto es característico de cualquier teoría de ese tipo que reproduzca con exactitud las predicciones de la teoría cuántica.

Provistos del análisis de Bell, John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony y Richard Holt (1969), de las universidades de Columbia, Boston y Harvard, propusieron un experimento concreto para aplicar en él la prueba de las desigualdades de Bell. Sin embargo, los resultados experimentales que obtuvieron no fueron concluyentes Sí lo fueron los que llevó a cabo en el Instituto de Óptica Teórica y Aplicada de Orsay, en las cercanías de París, un equipo dirigido por Alain Aspect (n. 1947). Y el resultado (Aspect, Dalibard y Roger 1982) favoreció a la mecánica cuántica. Será rara, contraintuitiva, con variables que no se pueden determinar simultáneamente, socavará nuestra idea

tradicional de lo que es la realidad, pero es cierta, o no se ha demostrado lo contrario. El análisis de Bell y el experimento de equipo de Aspect muestran con especial claridad el ya señalado entrelazamiento, la no localidad que tanto disgustaba a Einstein. El problema de fondo es, por supuesto, si esta no localidad implica transmisión de información a velocidades superiores a la de la luz, algo que violaría los requisitos de la teoría especial de la relatividad, conduciendo a graves dificultades de «cronología temporal», o «paradojas temporales». El propio Alan Aspect (1981: 76-77) ha argumentado que no es este el caso:

Si la experiencia con las variables polarizadas [se refiere a los experimentos que estaba realizando y que culminaría poco después] está de acuerdo con las previsiones cuánticas, habrá que concluir que las correlaciones a distancia entre sucesos separados por intervalos de género espacio, no se pueden interpretar simplemente en términos de causas comunes en el pasado. La elección de la orientación de un polarizador parece, pues, influir «instantáneamente» (es decir, más rápidamente que la velocidad de la luz) sobre los resultados de la medida en el otro polarizador. De ahí a imaginar que se pueda «telegrafiar» (transmitir señales utilizables) con una velocidad superior a la de la luz, no hay más que un paso... que habría que guardarse mucho en dar.

Existe una demostración «técnica» rigurosa sobre la imposibilidad de transmitir señales utilizables «supraluminosas» con semejante esquema experimental.

Y a continuación esbozaba la demostración «técnica» en cuestión. El punto central es distinguir «velocidad» e «información utilizable».

La no localidad abre, asimismo, posibilidades que parecen pertenecer al dominio de la ciencia-ficción. Utilizaré, en este sentido, lo que ha escrito el divulgador científico Amir Aczel (2004: 20): «Mediante el entrelazamiento, puede también «teleportarse» el estado de una partícula hasta un destino lejano, como sucede con el capitán Kirk en la serie televisiva Star Trek cuando pide ser proyectado de vuelta al Enterprise. Para ser preciso, nadie ha sido todavía capaz de teleportar a una persona. Pero el estado de un sistema cuántico ha sido teleportado en el laboratorio. Es más, este increíble fenómeno está comenzando a emplearse en criptografía y (podría usarse) en la futura computación cuántica».

En la física cuántica no es infrecuente que la realidad supere, o al menos iguale en algunos casos, a la ficción. Y la teleportación cuántica lo demuestra. En una conferencia que se celebró en Montreal en 1992, William Wooters, del Williams College (Massachusetts) reveló un curioso resultado teórico que él y Asher Peres, del Instituto de Tecnología Technion, de Israel, habían obtenido cuando consideraban dos estados cuánticos idénticos pero desconocidos (dos fotones, por ejemplo), ambos polarizados vertical u horizontalmente. Encontraron que si los dos estados habían interaccionado previamente, esto es, si estuvieran entrelazados, un observador podría obtener la máxima información posible acerca del sistema mediante una sola medición del par de estados, en lugar de múltiples medidas sobre los componentes individuales, como parecía ser más intuitivo. Después de su charla, Wooters, Peres y otros cuatro científicos, entre los que se encontraba Charles Bennett, del centro de IBM en Nueva York, se pusieron de acuerdo para desarrollar aquella idea. La colaboración entre físicos estadounidenses, canadienses, ingleses e israelitas formada por Charles Bennet, Gilles Brassard, Claude Crépeau, Richard Jozsa, Asher Peres y William Wootters (1993) condujo a un método para teletransportar estados cuánticos: supusieron que existían dos experimentadores, Alice y Bob, separados por una cierta distancia. Inicialmente, Alice tiene una partícula en un cierto estado cuántico, que puede no conocer. El propósito es que Bob obtenga una réplica exacta de la partícula. No es posible explicar aquí el método diseñado por los autores de ese artículo, pero sí es necesario señalar que el teletransporte implica que Alice transmite el estado de, digamos, una partícula de espín ½ a Bob sin que el propio estado se transmita de Alice a Bob.[243] Lo que se transmite es el estado, no el conocimiento del estado. Como dije, puede que Alice no conozca el estado de la partícula, pero no necesita saberlo y aunque al final del proceso Bob posea un estado idéntico, tampoco lo conoce: cualquier intento de conocerlo, lo modificaría. Como ha señalado Alberto Galindo (2009: 320-321): «Nótese que no se teletransporta ni materia ni energía. Se ha teleportado información [...] pero no a velocidad superlumínica».

Confirmándonos que no estamos soñando, sumergidos en oníricas aventuras teóricas, se han realizado experimentos de teleportación de fotones a fotones, de átomos a otros átomos idénticos y experimentos híbridos de materia a luz. Entre fotones, lo consiguió por primera vez, en 1997, el grupo del Instituto Experimental de la Universidad de Innsbruck dirigido por Anton Zeilinger (Bouwmeester, Pan, Mattle, Eibl, Weinfurter y Zeilinger 1997, 1998), mientras que en los otros casos que he mencionado se han realizado ya en el siglo XXI. En principio, la teleportación se llevó a cabo dentro de un mismo laboratorio,

pero en 2004 se consiguió teletransportar fotones a una distancia de 600 metros, a lo largo de una fibra óptica de vidrio bajo el Danubio, en Viena.

El trabajo del grupo de Zeilinger constituyó la primera demostración experimental de que, como ellos mismos señalaban (Bouwmeester, Pan, Mattle, Eibl, Weinfurter y Zeilinger 1998: 1733), «es posible comunicar información en el proceso de teleportación cuántica». Resultados como este fueron esenciales para el establecimiento de una nueva especialidad: la computación cuántica. Porque, en efecto, el entrelazamiento cuántico permite la formulación de nuevos métodos para la transferencia de información y para desarrollar algoritmos que conduzcan a computadores cuánticos y a la criptografía cuántica.

Aunque sin considerar los desarrollos que he venido tratando sobre la no localidad cuántica, la idea de la computación cuántica ya la consideró Richard Feynman en un curso sobre computación que impartió en Caltech entre 1981 y 1986, y con cuyas notas se produjo un libro, Lectures on Computation (Feynman 1996). Uno de los capítulos de esta obra, el sexto, trata de «Computación cuántica» (Feynman 1996: 182-184) y en él se alude al elemento central en la computación cuántica: utilizar el que la superposición cuántica permite manejar estados en más de dos situaciones —los bits 1 o 0—, dando lugar a qubits. La primera propuesta realista para la construcción de una computadora cuántica fue obra del español Ignacio Cirac y el austriaco Peter Zoller, miembros entonces del Instituto de Física Teórica de la Universidad de Innsbruck (Cirac y Zoller 1995). El esquema que propusieron estaba compuesto por un conjunto de N iones fríos confinados con luz láser, que, demostraron, formarían un sistema lo suficientemente estable como para producir una computadora cuántica. Pero la computación cuántica será algo que se logrará, esperemos, bien avanzado el siglo XXI; la segunda mitad del siglo XX lo que produjo fue su idea, lo que no es poco.

MULTIUNIVERSOS

Una de las cosas que se suelen decir con relación a la cosmología es que se trata de una materia muy especial, puesto que Universo solo hay uno, no siendo posible, por consiguiente, experimentar con él, lo que no ocurre con el resto de los sistemas de los que trata la física (por supuesto, se experimenta, y de esta forma se conoce lo que contiene el Universo). Pues bien, a lo largo de la segunda mitad del siglo XX surgió la idea de que acaso no hay uno, sino múltiples, infinitos acaso, universos (multiuniversos). El principal responsable de esta idea fue Hugh Everett III (1930-1982). Graduado en 1953 en ingeniería química por la Catholic University de Washington D. C., Everett entró en la Universidad de Princeton con la intención de doctorarse en física y, aunque lo que más le atrajo durante los primeros cursos que siguió fue la teoría de juegos, finalmente, y bajo la influencia del curso que dictó el filosóficamente inclinado Eugene Wigner sobre «Métodos de física matemática», decidió centrarse en la interpretación de la mecánica cuántica. Al contrario que a la mayoría de sus contemporáneos, la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, tan favorecida por el influyente Niels Bohr, no le convenció, en especial la extraña mezcla entre los mundos clásico y cuántico: la función de onda seguía su camino cuántico, hasta que el «colapso de la función de onda», una medida clásica, concretaba, con una cierta probabilidad (que la teoría cuántica permitía calcular), un estado determinado de entre los diferentes estados con los que había «navegado». Everett pensaba que semejante dicotomía entre una descripción cuántica y una clásica, constituía una «monstruosidad filosófica».[244] Lo que se propuso, en consecuencia, fue prescindir del postulado del colapso de la función de onda y tratar de incluir al observador en la función de onda.

No es fácil explicar en pocas palabras la teoría que elaboró Everett; de hecho, el director de su tesis, John Wheeler, tuvo dificultades para aceptar todo su contenido, induciéndole a varias revisiones de su trabajo inicial, incluyendo recortar la primera versión que escribió de su tesis y limitar la fuerza de algunas de sus aserciones aunque, por otra parte, reconoció su valor. Me limitaré a citar un par de pasajes del artículo que publicó en Reviews of Modern Physics (Everett III 1957) y que coincide con la versión final de su tesis doctoral (obtuvo su Ph.D en abril de 1957).[245] Se lee en él (Everett III 1957; Barret y Byrne, eds. 2012: 180): «En general no existe nada parecido a un único estado de un

subsistema de un sistema compuesto. Los subsistemas no poseen estados que son independientes de los estados del resto del sistema, de manera que los estados de los subsistemas están en general correlacionados entre sí». Y (Everett III 1957; Barret y Byrne, eds. 2012: 189):

De esta manera llegamos a la siguiente imagen: a lo largo de toda la secuencia de procesos de observación, solamente existe un sistema físico que representa el observador, aunque no existe un único estado para el observador [...] Sin embargo, existe una representación en términos de una superposición [...] Por consiguiente, con cada observación (o interacción) sucesiva, el estado de observador «se desdobla» [branches] en un número de estados diferentes. Cada rama [branch] representa un resultado diferente de la medición y los autoestados correspondientes para el estado objeto-sistema. Todas las ramas existen simultáneamente en la superposición tras una secuencia dada de observaciones.

En esta última cita nos encontramos lo que se convertiría en la característica más representativa de la teoría de Everett. Pero esa característica no la promovió él, sino, como veremos enseguida, Bryce DeWitt.

Básicamente y a pesar de que sus ideas contuvieran las cargas de profundidad que explotó DeWitt, Everett pensó sobre todo en términos de los estados de la función de onda y de la interpretación de la mecánica cuántica. Y las dificultades que encontró para defender su tesis (Wheeler no quería ofender a los defensores —auténticos «ideólogos»— de la interpretación de Copenhague, con Bohr, con quien Wheeler mantenía estrechas relaciones, a la cabeza).[246] Desilusionado con las experiencias que había padecido, tras doctorarse Everett abandonó la investigación en física, dedicándose al análisis de operaciones en el recientemente constituido Grupo de Evaluación de Sistemas de Armamento del Pentágono. De hecho, antes de presentar su tesis ya había estado realizando trabajos ligados a investigaciones de alto secreto de ese Grupo. De acuerdo con los términos de su contrato, debería doctorarse para conservar su trabajo allí, algo que le animó (u obligó) a finalizar su tesis. En 1964, y junto a otros compañeros del Grupo de Evaluación de Sistemas de Armamento, fundó una compañía comercial, Lambda Corp., para aplicar los modelos militares a problemas civiles. En 1973 abandonó Lambda para crear DBS Corporation, una consultora en temas de computadoras. No tuvo, sin embargo, éxito con aquella iniciativa; como han señalado Barret y Byrne (eds. 2012: 367): «En el momento

de su fallecimiento, en 1982, a la edad de 51 años, la compañía consultora de Everett se estaba desintegrando debido a los recortes en los presupuestos de investigación militar y su inadecuado manejo del negocio. Estaba arruinado, financiera y personalmente, su cuerpo destruido por su compulsiva adicción al tabaco, bebida y comida. Su matrimonio hacía tiempo que tenía problemas y su discreta esposa, Nancy, estaba resignada a aceptar sus múltiples relaciones con empleadas y prostitutas».

Fue Bryce DeWitt quien rescató y modificó la teoría de Everett, convirtiéndola en «la interpretación de los muchos mundos», el título de una recopilación de trabajos de Everett que DeWitt y Neill Graham editaron en 1973: The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics (DeWitt y Graham, eds. 1973). Antes, DeWitt (1970) había publicado un atractivo, y a la postre influyente, artículo en Physics Today, la revista de la American Physical Society, en el que presentaba la teoría de Everett bajo el sugerente título de «Mecánica cuántica y realidad». Recordando aquel escrito, DeWitt señaló (DeWitt-Morette 2011: 95): «El artículo de Physics Today estaba escrito deliberadamente en un estilo sensacionalista. Introduje una terminología (“desdoblamiento” [splitting], múltiples “mundos”, etc.) que fueron inaceptables para algunas personas y a la que un cierto número objetó porque, como mínimo, carecían de precisión». Las ideas, la versión de la teoría de Everett implícita en la presentación de DeWitt, y la que se ha mantenido, con cierto florecimiento en los últimos tiempos, es la de que la función de onda del Universo, la única que realmente tiene sentido según Everett, se desdobla con cada proceso de «medida», originando mundos, universos, que a su vez se desdoblan en otros, en una secuencia imparable y seguramente infinita.

En el artículo de Physics Today, DeWitt (1970: 165) escribió que «ningún experimento puede mostrar la existencia de “otros mundos”» y que «sin embargo, la teoría tiene el mérito pedagógico de sacar a la palestra muchos de los problemas fundamentales y proporcionar así una base útil de discusión».

En general, y durante mucho tiempo (en los últimos años la situación está cambiando), la idea de los multiuniversos fue poco valorada, cuando no considerada poco menos que ridícula. Un buen ejemplo en este sentido es lo que manifestó John Bell (1981, 1990: 190-191):

Primero hay el concepto de los «muchos universos» realzado por Everett y DeWitt. En la teoría usual se supone que solo uno de los posibles resultados de una medida se realiza en una ocasión dada y la función de onda se «reduce» de acuerdo con ello. Pero Everett introduce la idea de que todos los resultados posibles se realizan cada vez, cada uno de ellos en una edición diferente del Universo, el cual está por lo tanto multiplicándose continuamente para acumular todos los resultados posibles de todas las medidas. Se supone un paralelo psico-físico tal que nuestros representantes en un universo «rama» dado son conscientes solo de lo que ocurre en esa rama. A mí, esta multiplicación de universos me parece extravagante y que no sirve para un propósito real en la teoría, y puede simplemente eliminarse sin repercusiones. Así que no veo razón alguna en insistir en esta particular diferencia entre la teoría de Everett y la de la onda-piloto [propuesta por Louis de Broglie], donde, aunque la onda no se reduce nunca, solo un conjunto de valores de las variables x se realiza en cada instante. Salvo que la onda está en el espacio de configuración y no en el espacio tridimensional ordinario, la situación es la misma que en la teoría del electrón de Maxwell-Lorentz. Nadie se sintió molesto porque el campo se suponía existente y propagándose incluso en puntos donde no había ninguna partícula. El tener universos multiplicadores para realizar todas las posibles configuraciones de las partículas, habría parecido grotesco.

El futuro dirá si, en cualquier caso, ningún experimento puede mostrar que existen otros universos. De lo que no hay duda es que, como sostenía DeWitt, la interpretación de los muchos mundos ha sido, todavía continúa siéndolo, interesante tanto desde el punto de vista de la física como del de la filosofía.

III

FENÓMENOS CUÁNTICOS MACROSCÓPICOS

Estamos acostumbrados a pensar que el dominio de la física cuántica es únicamente el microscópico, el de las partículas elementales, los átomos, o el de las radiaciones, pero no es así, aunque es cierto que históricamente estos fenómenos fueron los responsables de la génesis de la física cuántica. Dos manifestaciones principales de esa física cuántica macroscópica son los condensados de Bose-Einstein y la superconductividad.

CONDENSADOS DE BOSE-EINSTEIN Y SUPERFLUIDEZ

Los condensados (o la condensación) de Bose-Einstein procede del artículo que publicó en 1924 el físico hindú Satyendranath Bose, en el que introducía una nueva estadística (una forma de contar fotones) para explicar la ley de radiación de un cuerpo negro que había llevado a Max Planck a introducir la primera noción de cuantización en 1900. Fue Einstein quien reconoció el valor (y ayudó a que fuese publicado) del trabajo de Bose (1924), trabajo que completó con dos artículos (Einstein 1924, 1925) en los que ampliaba las conclusiones de Bose. Señaló, por ejemplo, que en un gas de fotones se podría producir una condensación: «una parte "se condensa" y la restante continúa siendo un gas perfecto saturado» (Einstein 1925). Con la expresión «condensación», Einstein quería decir que un grupo de fotones actúa como si fuese una unidad, sin que entre ellos parezca que existan fuerzas de interacción. Además, predijo que «si la temperatura desciende lo suficiente», se produciría en ese gas «una caída brutal y acelerada de la viscosidad en el entorno de una cierta temperatura», que estimaba para el helio liquido —en el que ya había indicios de tal superfluidez— en unos 2 kelvin.

No obstante, hubo que esperar hasta el 8 de enero de 1938 para que se produjera un avance en la predicción einsteiniana de la existencia de superfluidez. Fue entonces cuando se publicaron en la revista inglesa Nature dos breves artículos, uno a cargo de Piotr Kapitza —quien nos apareció brevemente en el capítulo segundo, con relación a Landau—, director del Instituto de Problemas Físicos en Moscú y anteriormente (hasta que en 1934 Stalin le retuvo en la Unión Soviética, durante uno de sus viajes de vacaciones) catedrático en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, y un segundo artículo de dos jóvenes físicos canadienses que estaban trabajando en el Laboratorio Mond que la Royal Society patrocinaba en Cambridge (Inglaterra), Jack Allen y Don Misener. En ellos (Kapitza 1938; Allen y Misener 1938) se anunciaba que el helio líquido fluía prácticamente sin sufrir la resistencia de la viscosidad por debajo de 2,18 K (al helio líquido normal se le denomina He I, mientras que el superfluido es He II). Sin embargo, fueron Fritz London (1938) y Laszlo Tisza (1938) quienes demostraron teóricamente que este fenómeno constituía la evidencia de la superfluidez: London argumentó que la transición al estado de superfluidez únicamente se podría comprender en términos de la condensación de Bose-

Einstein, mientras que Tisza propuso considerar al helio superfluido como una mezcla de helio normal y otro superfluido; ambos componentes tienen comportamientos hidrodinámicos y contenidos caloríficos diferentes, pero en el cero absoluto todo el líquido se hace superfluido.

Tres años después, Lev Landau (1941) desarrolló la fenomenológica teoría de Tisza, suponiendo que el helio líquido normal estaba formado por un gas de «excitaciones elementales», fonones, y, un concepto nuevo, rotones con vorticidad.[247] Más tarde, en una serie de artículos, el primero de los cuales apareció en 1953, Richard Feynman (1953, 1954 a, b) demostró que algunas de las fenomenológicas suposiciones de Landau se podían explicar en base a la física cuántica y que los rotones eran el análogo mecano-cuántico de anillos vorticiales microscópicos. Como mencioné en el capítulo segundo, en 1962 Landau recibió el Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre la superfluidez del helio II.

Como vemos, la vieja idea que Einstein había propuesto en 1924, y a la que apenas se había prestado atención, se manifestaba, más desarrollada, en sistemas muy diferentes al de los gases ideales considerados por el creador de la relatividad.

En la actualidad damos a los descubrimientos de 1938-1941 un gran valor, en la medida en que muestran macroscópicamente un comportamiento cuántico, sin embargo, en su momento este aspecto no se destacó tanto. Para comprender mejor la relación entre la condensación de Bose-Einstein y los aspectos macroscópicos de la física cuántica, hubo que producir «superátomos», conjuntos de átomos que se comportasen como una unidad y fuesen perceptibles macroscópicamente (si se enfrían lo suficientemente, las longitudes de onda de los átomos serán tan grandes que se «solaparán», perdiendo así sus identidades individuales y creando un estado cuántico macroscópico, un «superátomo», un condensado de Bose-Einstein). Semejante logro se alcanzó mucho más tarde, en 1995. Aquel año, un grupo de físicos de la Universidad de Colorado liderados por Eric Cornell y Carl Wieman, en una colaboración entre su universidad y el National Institute of Standards and Technology (el antiguo National Bureau of Standards), y enfriándolos en una «trampa magnética» utilizando una combinación de un láser y enfriamiento mediante evaporación, lograron formar un superátomo (87 átomos) de rubidio, un condensado de Bose-Einstein (Anderson, Ensher, Matthews, Wieman y Cornell 1995), y unos meses después el equipo de Wolfgang Ketterle en el MIT, consiguió otro de sodio (Davis,

Mewes, Andrews, van Druten, Durfee, Kurn y Ketterle 1995). Los tres investigadores principales, Cornell, Wieman y Ketterle, recibieron el Premio Nobel de Física de 2001.

Veamos cómo han descrito los dos primeros su aportación (Cornell y Wieman 2003: 82):

Nuestro grupo de investigación del Instituto Conjunto de Astrofísica del Laboratorio, en Boulder, creó en junio de 1995 una gota, aunque minúscula, maravillosa. Al enfriar 2.000 átomos de rubidio hasta una temperatura inferior a 100 milmillonésimas de grado sobre el cero absoluto (100 milmillonésimas de grados kelvin) hicimos que los átomos perdiesen su identidad individual y se comportaran como si fuesen un único «superátomo». Las propiedades físicas de todos ellos, sus movimientos, por ejemplo, se volvieron idénticas. Este condensado de Bose-Einstein, el primero observado en un gas, viene a ser el análogo material del láser, con la diferencia de que en el condensado son átomos, no fotones, los que danzan al unísono.

Y más adelante añadían (Cornell y Wieman 2003, 82-84):

Raras veces vemos los efectos de la mecánica cuántica reflejados en la conducta de una cantidad macroscópica de materia. Las contribuciones incoherentes del inmenso número de partículas de cualquier porción de materia oscurecen la naturaleza ondulatoria de la mecánica cuántica; solo podemos inferir sus efectos. Pero en la condensación de Bose la naturaleza ondulatoria de cada átomo está en fase con las demás; y lo está de manera precisa. Las ondas mecano-cuánticas atraviesan la muestra entera y se observan a simple vista. Lo sub-microscópico deviene macroscópico.

La creación de condensados de Bose-Einstein ha arrojado luz sobre viejas paradojas de la mecánica cuántica. Por ejemplo, si dos o más átomos están en un solo estado mecánico-cuántico, y eso es lo que pasa en un condensado, será imposible distinguirlos, se haga la medición que se haga. Los dos átomos ocuparán el mismo volumen de espacio, se moverán a la misma velocidad,

dispersarán luz del mismo color, etc.

En nuestra experiencia, basada en el trato constante de la materia a temperaturas normales, no hay nada que nos ayude a comprender esta paradoja. Por un motivo: a las temperaturas normales y a las escalas de magnitud en que nos desenvolvemos, es posible describir la posición y el movimiento de todos y cada uno de los objetos de un conjunto [...] A temperaturas bajísimas o a escalas de magnitud pequeñas, la mecánica clásica va perdiendo vigor... No podemos saber la posición exacta de cada átomo, y es mejor imaginarlos como manchas imprecisas. La mancha es un paquete de ondas, la región del espacio donde cabe esperar que esté el átomo. Conforme el conjunto de átomos se enfría, crece el tamaño de los paquetes de ondas. Mientras cada uno esté espacialmente separado de los demás será posible, al menos en principio, distinguir átomos entre sí. Pero cuando la temperatura llega a ser lo bastante baja los paquetes de ondas de los átomos vecinos se solaparán. Entonces, los átomos «se Bose-condensarán» en el menor estado de energía que sea posible, y los paquetes de ondas se fundirán en un solo paquete macroscópico. Los átomos sufrirán una crisis cuántica de identidad: ya no podremos distinguir unos de otros.

El artículo del grupo de Colorado-National Institute of Standards and Technology apareció en la portada del número de Science del 14 de julio de 2003. En el mismo número, Keith Burnett, de la Universidad de Oxford, denominaba el logro de haber obtenido el condensado de Bose-Einstein «el Santo Grial» de la física. Y no fue únicamente la comunidad científica la que recibió con entusiasmo el resultado, también el público se interesó por él, o al menos la prensa: aparecieron artículos en las primeras páginas del Washington Post, el New York Times y Los Angeles Times. Para Science fue el «Avance del año».

SUPERCONDUCTIVIDAD

La superconductividad es otro de los fenómenos físicos en los que la cuantización se manifiesta macroscópicamente. El fenómeno en sí fue descubierto en 1911, cuando el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), el gran pionero y experto mundial en bajas temperaturas, encontró en su laboratorio de Leiden que cuando enfriaba el mercurio a 4 K, se anulaba por completo su resistencia ante el paso de una corriente eléctrica (Kamerlingh Onnes 1911). Una vez iniciada esa corriente, continuaría indefinidamente aunque no se le aplicase ninguna diferencia de potencial. Más tarde se encontró que otros metales y compuestos también se hacían superconductores a temperaturas cercanas al cero absoluto de temperatura. Ahora bien, una cosa es la evidencia experimental y otra la explicación teórica, y esta tardó en llegar. Fue en 1957 cuando los estadounidenses John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer desarrollaron una teoría cuántica de la superconductividad (conocida por las iniciales de sus apellidos: teoría BCS).[248] El punto clave de su explicación (Bardeen, Cooper y Schrieffer 1957) residía en suponer que, a partir de una cierta temperatura (la temperatura de transición), los electrones que transportan la corriente eléctrica en un superconductor se agrupan en parejas —como había supuesto con anterioridad Cooper (1956)—: son los denominados «pares de Cooper», que actúan como bosones; esto es, partículas con requisitos cuánticos similares a los de los fotones. El emparejamiento que se produce a temperaturas muy bajas, se debe a la interacción «atractiva» entre los electrones, en la que colaboran las vibraciones de los átomos del material superconductor (los denominados fonones). De esta manera, los pares de electrones marchan como un armonioso ejército de bosones que ignoran los impedimentos atómicos (las colisiones). Esta propiedad cuántica se manifiesta macroscópicamente de diversas maneras, entre las que destaca el conjunto de fenómenos denominados «efectos Josephson» (Josephson 1962), que, bajo determinadas condiciones, permiten observar el paso de una corriente de pares de electrones entre dos superconductores separados por un aislante.[249]

La teoría BCS constituyó un éxito formidable de la física cuántica, pero no es totalmente satisfactoria, como se puso en evidencia por su incapacidad de predecir y explicar la existencia de superconductividad en materiales cerámicos a temperaturas mucho más elevadas que las que se manejaban hasta entonces

(unos cuantos grados kelvin). Fue en 1986, en los laboratorios de IBM de Zúrich, donde Georg Bednorz y Alexander Müller (1986) encontraron que un óxido de lantano, bario y cobre era superconductor a temperaturas más altas (no, claro, para nuestras experiencias cotidianas) del orden de 30 K.[250] El año siguiente, Paul Chu (1987) elevó la escala de temperaturas superconductoras, hallando un óxido de itrio, bario y cobre que se volvía superconductor a la temperatura de 93 K, temperatura que se puede alcanzar sin más que bañar ese óxido en nitrógeno líquido que —a diferencia del helio— es más abundante y más barato de licuar. Desde entonces, el número de materiales (inorgánicos y orgánicos) que muestran superconductividad no ha hecho sino aumentar.

El hallazgo de Bednorz y Müller (1986),[251] por el que recibieron el Premio Nobel de Física en 1987, abre nuevas perspectivas no solo a la física sino también y, acaso sobre todo, a la tecnología: materiales superconductores a temperaturas a las que se puede llegar en el mundo cotidiano pueden revolucionar nuestras vidas algún día.

IV

HIJOS DE LA FÍSICA CUÁNTICA: CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN EL MUNDO CUÁNTICO

LA FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO, TRANSISTORES, «CHIPS» Y CIRCUITOS INTEGRADOS

La relevancia de la física cuántica en la tecnología, un comentario que ya hice al tratar la superconductividad, va todavía mucho más lejos. Es posible que materiales superconductores cambien en el futuro nuestras vidas, pero de lo que no hay duda es de que otros materiales, los semiconductores, ya las han cambiado.[252] La primera gran aplicación de los semiconductores llegó poco antes de que comenzase la segunda mitad del siglo XX, con la invención del transistor, debida a John Bardeen, William Shockley (1910-1989) y Walter Brattain (1902-1987), mientras trabajaban en el departamento de física del estado sólido de los Laboratorios Bell.

El transistor es un hijo de la física cuántica, más concretamente de una rama de esta, la «física del estado sólido», como se la conoció antes de que adoptase el nombre de «física de la materia condensada», pero es un hijo que nació en un hogar «multicultural», por decirlo de alguna manera, un hogar en el que ciencia, tecnología y sociedad se dieron la mano. La importancia, y el extraordinario desarrollo que esta especialidad conoció durante la segunda mitad del siglo XX, hacen que sea conveniente decir algo sobre los orígenes de la física del estado sólido.[253]

Entre 1927 y 1928, Arnold Sommerfeld desarrolló en Múnich una teoría semiclásica de los metales que funcionaba mejor que la clásica de Drude-Lorentz (basada en el electromagnetismo de Maxwell), pero que no dejaba de tener problemas. Por una parte, se trataba de una formulación en la que a un esqueleto esencialmente compuesto por la física clásica se le habían añadido

algunos elementos cuánticos (como la existencia de valores discretos para la energía de los electrones y la estadística de Fermi-Dirac); por otra parte, no se consideraban dos importantes efectos físicos: el de la periodicidad de las estructuras cristalinas (redes de átomos) de los metales, y la interacción electrón-electrón más allá de lo que establecía una aproximación desarrollada por el físico inglés Douglas Hartree (1928 a, b, c), [254] aunque en su modelo Sommerfeld asumía el potencial que sentían los electrones como constante —nulo con un desplazamiento adecuado de energía—, es decir, que los electrones eran libres de desplazarse por el interior del metal. Se necesitaba una teoría realmente cuántica. Un avance notable en ese sentido fue la teoría desarrollada por el primer estudiante de doctorado que tuvo Heisenberg: el suizo Felix Bloch (1905-1983). [255]

Antes de trasladarse a Leipzig para doctorarse con Heisenberg, Bloch había estudiado en Zúrich, donde se familiarizó con la mecánica ondulatoria (incluso estuvo presente en el primer seminario que dio Schrödinger presentando su nueva teoría).[256] Estaba, por consiguiente, en inmejorables condiciones para intentar aplicar la mecánica cuántica a problemas específicos, un sentimiento este que su asociación con Heisenberg reforzó, ya que el creador de la mecánica de matrices estaba interesado sobre todo en aplicar la reciente mecánica a cuantos más problemas mejor. Eso fue, en esencia, lo que Bloch (1928) hizo: supuso que los electrones del cristal responsables de la conducción eléctrica no interaccionaban entre sí (esto le permitía reducir el problema al estudio de un electrón independiente) y que los electrones estaban sometidos a un potencial periódico producido por el resto de los electrones y los núcleos del metal (estos últimos en su posición de equilibrio, a modo de red tridimensional con una periodicidad determinada, constituyendo la estructura cristalina), siendo la periodicidad de ese potencial la misma que la del metal. Resolvió la correspondiente ecuación de Schrödinger para un electrón ayudándose con métodos de Fourier, encontrando que, a diferencia de los electrones libres que se podían describir mediante una onda plana, el movimiento de los electrones de conducción en un potencial periódico estaba descrito por una onda plana modulada por una función periódica, que mostraba la misma periodicidad que la red de átomos del metal (este resultado se conoce como «teorema de Bloch»). Finalmente, supuso que el potencial que sentían los electrones era más fuerte que la energía cinética de su movimiento y determinó que relación energía-momento no era cuadrática, como para los electrones libres. Aunque el propio Bloch no terminó de verlo con total claridad, las soluciones que obtenía llevaban a la «teoría de bandas», el concepto fundamental sobre el que se levantó la física del

estado sólido.[257] El papel de las bandas quedó más claro en los cálculos que realizó Hans Bethe, suponiendo que el potencial del cristal que sentían los electrones era débil. En este caso, aunque no libres, los electrones se movían bastante libremente, lo que significaba que para determinados estados de energía de los electrones se reproducía el resultado del modelo de electrones libres. Pero este modelo mostraba con mayor claridad que existían determinados rangos de energía, determinados estados electrónicos, que los electrones de un cristal no podían ocupar. Las soluciones obtenidas por Bloch implicaban, en efecto, que no todos los niveles energéticos eran accesibles a los electrones de conducción: existían también niveles prohibidos.[258]

Sin embargo, los modelos de bandas no bastaban para explicar, por ejemplo, fenómenos de bajas temperaturas como la superconductividad, o transiciones de fase, donde las interacciones entre electrones eran importantes (hasta después de la Segunda Guerra Mundial no se desarrollaron los métodos de muchos cuerpos necesarios, con conceptos nuevos como fonones, ondas de espín o cuasi partículas). Tampoco explicaban el valor anómalo del efecto Hall.

Rudolf Peierls, otro estudiante de Heisenberg, que llegó a Leipzig cuando Bloch estaba realizando su tesis, profundizó más que este en la teoría de bandas, prestando atención especial a la relación no cuadrática energía-momento de los electrones. Esto le permitió descubrir que los electrones de los estados superiores de las bandas electrónicas permitidas tienen una velocidad de grupo que disminuye con el momento del cristal (al contrario de lo que sucede con los electrones libres), explicando este comportamiento en términos de una masa efectiva negativa para los electrones, debida a la curvatura negativa de las bandas. Quedaba así implícita la existencia de los «huecos» (estados vacantes que se comportaban como partículas de carga positiva), a la vez que se ofrecía una explicación del efecto Hall anómalo (Peierls 1929).[259]

Con estas nuevas propuestas fue posible, en un periodo de tiempo relativamente corto (entre, aproximadamente, 1928 y 1933), comprender la diferencia entre metales y aislantes, así como la naturaleza de los semiconductores, el efecto Hall anómalo y otros fenómenos, cuya explicación había desafiado hasta entonces a los investigadores.[260] Nacía, en definitiva, la «física del estado sólido», un término, por cierto, que aunque se había utilizado desde hacía años (por ejemplo por Walter Nernst (1913) en el ciclo de cuatro conferencias que pronunció en marzo de 1913 en el University College de Londres, publicadas como The Theory of the Solid State), comenzó a aparecer, bajo la rúbrica de «cuerpos

sólidos», «agregados sólidos» o «estado sólido», hacia 1930. Así, en el semestre de invierno de 1930-1931 Heisenberg ofreció en Leipzig un curso titulado «Teoría cuántica de los cuerpos sólidos»; dos años después Friedrich Hund daba otro sobre «Teoría del estado sólido», mientras que en Zúrich, Paul Scherrer dictó en 1930 un curso sobre «Física de los estados agregados sólidos».

Como otras ramas de la física cuántica que habían nacido en Europa, también la física del estado sólido fue trasplantada a Estados Unidos, aunque aún quedasen algunos grupos notables, sobre todo, en Inglaterra y Francia. Y en este punto, dando, sin duda, un salto importante, daré entrada de nuevo a un viejo personaje de este libro: el radar. Como protagonista muy especial de la Segunda Guerra Mundial, no es sorprendente que, una vez finalizada, se continuase trabajando en su mejora. Como sabemos, un radar funciona mediante la detección de las ondas reflejadas por el objeto en estudio. Para ello, se necesitan detectores muy sensibles, ya que las señales que se reciben son débiles. Al ser estas señales ondas (por consiguiente, con valores sucesivamente positivos y negativos) el valor medio de la señal recibida en una antena es cero, por lo que se precisa rectificar la señal. En los inicios del radar (década de 1940), existía el problema de que las válvulas electrónicas (de vacío) conocidas no se podían utilizar como rectificadores, ya que la distancia entre sus electrodos era superior al tamaño requerido. Dos semiconductores, el silicio y, sobre todo, el germanio, atrajeron entonces la atención como posibles materiales para rectificadores.[261]

En realidad, el valor de algunos semiconductores como rectificadores era conocido desde hacía tiempo, por lo que no se puede hablar de que en la década de 1940 se descubriera este uso. En 1874, Ferdinand Braun había observado que un contacto entre un semiconductor y un metal tenía la propiedad de rectificar una corriente eléctrica. Tres años después, Braun encontraba que este efecto dependía del tamaño de los contactos, hallazgo que condujo al desarrollo del denominado rectificador «bigotes de gato» (cat’s whisker), en el que un pequeño punto metálico (el «bigote») produce un contacto rectificador en el semiconductor. Estos rectificadores/detectores se utilizaron hasta que las válvulas de vacío (componentes electrónicos que se utilizaban para amplificar, conmutar, o modificar una señal eléctrica controlando el movimiento de los electrones en un tubo a muy baja presión) los reemplazaron en la década de 1930. En general, no obstante, el camino de los semiconductores hacia la posición predominante que llegarían a alcanzar en la ciencia y en la industria de la segunda mitad del siglo XX fue complicado. A comienzos de la década de los 30 en Inglaterra, Alan Wilson, que en 1931 realizó el primer análisis mecánico-

cuántico de los semiconductores (todavía bastante primitivo), señaló (Wilson 1980: 47): «Al regresar [a Cambridge] en octubre de 1931 se mostró bastante interés en mis descubrimientos, pero cuando sugerí que acaso fuese el germanio una sustancia muy interesante para estudiar con detalle, el silencio fue ensordecedor».

Poco a poco, y de una forma en la que dominaba lo empírico, se fueron descubriendo algunas de las propiedades de los semiconductores: que rectificaban corrientes eléctricas, que su conductividad crecía con la temperatura y que este aumento de la conductividad era especialmente elevado cuando se le añadían cierto tipo de impurezas (dopándolos). Estas propiedades tenían evidente interés industrial, pero los problemas y la ignorancia que los rodeaba, la falta de una teoría que explicase estos comportamientos, constituían obstáculos importantes para su empleo. No era el menor de estos problemas el que las propiedades rectificadoras de los cristales semiconductores se veían afectadas por la no homogeneidad de los cristales disponibles.

El desarrollo del radar hizo que todos estos problemas adquirieran mayor importancia. Dos fueron los centros que más se distinguieron en el estudio de los semiconductores: el Departamento de Física de Purdue University, en Indiana, liderado por Karl Lark-Horovitz, y los Laboratorios Bell, con los que ya nos encontramos en el capítulo segundo. El laboratorio de Purdue, que antes de la guerra no se había interesado por este tipo de cuestiones, se especializó en el germanio, produciendo un análisis teórico de los procesos de conducción que tienen lugar en ese semiconductor, análisis que mostraría su gran valor después de la guerra, cuando fue utilizado en los Laboratorios Bell para el desarrollo del transistor. Por lo que respecta a su aportación al esfuerzo bélico, de tipo experimental y, en este sentido más práctica, los investigadores de Purdue desarrollaron métodos para producir germanio de gran pureza, logrando también controlar mejor la introducción de elementos dopantes.[262] Gracias a estos importantes logros, mejoraron el rectificador de germanio, desarrollando un prototipo que Western Electric comenzó a producir en 1944.

Por lo que se refiere a los Laboratorios Bell, antes de la guerra ya habían adquirido alguna experiencia con los semiconductores. El director (entre 1928 y 1934) del Departamento de válvulas de vacío, Mervin Kelly, comprendió las posibilidades que podían ofrecer. La capacidad de las válvulas de vacío de rectificar y amplificar señales, habían ayudado a la gran expansión del sistema telefónico que tuvo lugar en Estados Unidos en las décadas de 1920 y 1930

(negocio del que habían surgido los laboratorios Bell); pero las válvulas empleadas eran caras, voluminosas, no excesivamente fiables y malgastaban mucha energía. Por estos motivos Kelly se interesó en los semiconductores, e intentó establecer un programa en esa dirección, pero pareció ser una propuesta prematura, y no recibió la autorización pertinente, aunque sí que se realizaron trabajos ocasionalmente.

Otra oportunidad para que los Laboratorios Bell entraran en el ámbito de los semiconductores, y que terminaría conduciendo a ellos, surgió en 1937, cuando se recibió del Naval Research Laboratory el encargo de desarrollar un sistema de radar, lo que efectivamente hicieron, construyendo un radar que operaba en la región de longitud de onda de 60 centímetros, y que fue utilizado por la Marina en los primeros tiempos de la guerra. Esta experiencia fue lo que abrió a los Laboratorios Bell las puertas de los contratos del Rad Lab durante la Segunda Guerra Mundial. Durante los años de guerra, Bell produjo una gran cantidad de radares (desde portátiles hasta radares para instalar en submarinos, pasando, naturalmente, por los destinados a aviones), que Western Electric, la rama de producción de los laboratorios, construía. En conjunto, aproximadamente la mitad de la investigación realizada durante la guerra en los Laboratorios Bell estuvo relacionada con el radar. De recibir en 1939 unos 100.000 dólares al año de contratos con el Gobierno (lo que representaba el 1 por ciento de su presupuesto total), los Bell Labs pasaron en 1944 a recibir 56 millones, el 81 por ciento de sus gastos en investigación. Consecuentemente, el personal se multiplicó por diez. En otras palabras, la guerra resultó rentable para esta institución. Pero lo sería más, ya que los conocimientos obtenidos durante sus trabajos para el radar, que les llevaron a relacionarse con frecuencia con los investigadores de Purdue, terminarían conduciéndoles al transistor.

Una vez más Kelly insistió en el interés de los semiconductores; de hecho, lo hizo antes de que acabase la guerra. Pero ahora la situación era diferente a la de los años 30; él mismo había progresado en la jerarquía del laboratorio (en 1945 sería nombrado vicepresidente ejecutivo) y, además, la importancia de esos materiales era, si no evidente, casi, y otras empresas también mostraban su interés en ellos. Con varias décadas ya de experiencia en investigación industrial, Kelly y los directivos de Bell se dieron cuenta de que para progresar era necesario prestar atención a la física del estado sólido y, así, en 1945 reorganizaron el Departamento de Investigación Física, dando cabida a la física del estado sólido con un grupo dirigido por William Shockley, un graduado en física por Caltech, que se había incorporado a los Laboratorios el mismo año

(1936) que obtuvo su doctorado en el MIT. No se preveían resultados inmediatos, pero, como se señalaba en la memoria de 1940-1942, «era razonable esperar que en última instancia tal aproximación fundamental indicara el camino hacia la producción de nuevos materiales con propiedades de importancia para su utilización telefónica».[263]

Fue en este contexto en el que se descubrió el transistor, un dispositivo electrónico hecho de material semiconductor, que puede regular una corriente que pasa a través de él y también actuar como amplificador o célula fotoeléctrica, y, que comparado con los tubos de vacío que le precedieron, necesita cantidades muy pequeñas de energía para funcionar; además son más estables, compactos, actúan instantáneamente y duran más. Se pudo inventar cuando se comprendió que el contacto de dos cristales semiconductores, uno con un pequeño exceso de electrones y el otro en el que predominaban los «huecos» (concepto introducido en la física del estado sólido por Peierls), daba lugar a la denominada «unión p-n», un elemento esencial en la invención del transistor.

La «unión p-n» es la de dos semiconductores, uno de «tipo-p» y otro de «tipo-n». Estos tipos se producen de la siguiente manera. Supongamos que tenemos un material semiconductor, tipo silicio o germanio, formado por átomos cuyas capas externas tienen 4 electrones. El enlace (covalente) entre los átomos de estos elementos se forma compartiendo cada átomo sus 4 electrones con otros cuatro átomos adyacentes, dispuestos a modo de tetraedro, para formar cada átomo una capa estable de 8 electrones. Si se quita un átomo del material (silicio) y se sustituye, se dopa, por otro con, digamos, 5 electrones en su capa externa (el caso del fósforo), entonces quedará libre un electrón, que puede moverse fácilmente cuando se aplica un campo eléctrico externo; esto es, se facilita la conductividad. A este tipo de semiconductor dopado se le denomina «tipo-n». El caso del tipo-p es parecido pero, ahora, se añaden átomos cuya capa electrónica externa tenga 3 electrones (el boro, por ejemplo), con lo que en lugar de sobrar un electrón, falta uno. Se produce entonces un «hueco», una vacante de carga de magnitud igual a la del electrón pero positiva, que también se puede mover fácilmente en las condiciones adecuadas. Y se puede hacer una unión p-n modificando un cristal semiconductor y formando dos regiones, una de tipo-p, con mayoría de huecos, y otra de tipo-n, donde los electrones son mayoritarios.

En esencia, los dispositivos electrónicos funcionan mediante flujos controlados de cargas eléctricas, bien electrones (carga negativa) o huecos positivos, o ambos, que se desplazan en el interior; tanto electrones como huecos responden

a un campo eléctrico aplicado, moviéndose con velocidades que dependen del material empleado (en los semiconductores, para campos pequeños, la velocidad es proporcional al campo, siendo la constante de proporcionalidad la movilidad de los huecos o electrones). En los dos tipos de transistores que aparecerán enseguida —los primeros en fabricarse— esos flujos son diferentes: en el de contacto solamente son activos los portadores de carga de un mismo signo, mientras que en el de unión toman parte en la conducción los dos tipos de carga.

Entre los miembros del grupo de semiconductores dirigido por Shockley se encontraba Walter Brattain, que se había unido a los Laboratorios en 1929 y que trabajaba en semiconductores desde al menos 1937. A John Bardeen le contrataron en 1945, cuando se formó el grupo. Mientras que Shockely y Bardeen eran teóricos, Brattain era físico experimental.

De las propiedades entonces conocidas de los semiconductores y de los componentes electrónicos en uso, principalmente rectificadores de unión metal-semiconductor (de contacto tipo barrera o Schotty), Shockley dedujo que si el campo de un rectificador pudiese producir una capa espacial cargada en la intercara entre un metal y un semiconductor, entonces cambios en el campo eléctrico externo aplicado podrían modificar sustancialmente el número de portadores de carga y modular la corriente que pasase a través del semiconductor, dando así lugar a la base de un amplificador. En abril de 1945, mientras planeaba la formación del nuevo grupo de estado sólido en los Laboratorios, propuso otro dispositivo que, bastante más tarde, cuando se logró construir uno, se denominó «transistor de efecto de campo».[264] Utilizando de nuevo un electrodo metálico que forma un contacto barrera con un semiconductor, su idea era aplicar un campo eléctrico transversal de manera que pudiese aumentar o disminuir el número de portadores de carga en una lámina delgada de silicio o germanio, modificando así su conductividad y regulando la corriente que atravesara el dispositivo. Pero los intentos de producir con silicio ese dispositivo fracasaron, al igual que los de Shockley de explicar por qué. En octubre de 1945, Shockley pidió a Bardeen, que se acababa de incorporar al grupo de los Laboratorios, que comprobase los cálculos que había realizado para intentar averiguar el por qué no funcionaba su idea. En marzo de 1946, Bardeen ya sabía el motivo, la existencia de «estados superficiales» que atrapaban a los portadores de carga, pero lo importante ahora es que de esta forma Bardeen comenzó a trabajar en aquellos problemas. En este punto, entra en escena un descubrimiento experimental que realizó Brattain el 17 de noviembre de 1947, con el que se podía evitar algunas de las limitaciones del efecto del bloque del

campo: podía neutralizar el efecto de los estados superficiales, sumergiendo el semiconductor, el silicio, en un electrolito. Cuatro días después, Bardeen y Brattain trataron de utilizar este resultado para construir un amplificador, siguiendo la idea de Bardeen de utilizar un electrodo que entrase en contacto en un punto con una superficie especialmente preparada de silicio (un amplificador de punta de contacto). Pero, en lugar de las láminas delgadas de silicio que había utilizado Shockley en 1945, Bardeen propuso emplear una «capa de inversión» de tipo-n de unas pocas micras (una micra equivale a 10-6 metros) de espesor producida químicamente sobre la superficie inicialmente uniforme de silicio de tipo-p. Cuando probaron el dispositivo notaron que su poder de amplificación era pobre. Tres semanas después, el 8 de diciembre, probaron un nuevo dispositivo en el que a sugerencia de Brattain la lámina de silicio se había sustituido por otra de germanio tipo-n (material desarrollado en Purdue con el programa del radar). El resultado fue que obtenían una potencia de ganancia de 330 cuando aplicaban un potencial negativo, no positivo, como esperaban. Bardeen pensó que se había inducido por efecto del campo una capa de inversión y que estaba obteniendo una conducción por huecos, Esta idea fue muy importante y permitió crear el transistor de contacto, junto con un afortunado incidente mientras preparaban otra versión del dispositivo, en el que habían evaporado una lámina de oro. Tras estas nuevas mejoras y pruebas, llegó la definitiva, realizada el 16 de diciembre, fecha en que se puede decir que nació el transistor, «la célula nerviosa» del mundo actual. Una semana después, el 23 de diciembre de 1947, mostraron el dispositivo a los directores ejecutivos de los Laboratorios Bell, utilizándolo en un circuito que permitía oír el sonido amplificado con un par de auriculares.

Hoy denominamos al dispositivo en cuestión, «transistor de contacto» (point-contact transistor), ya que estaba formado por una lámina delgada de oro que, presionada con una cuña de plástico sobre la superficie de un cristal de germanio, hacía contacto en dos puntos muy próximos entre sí; pero al principio hubo dudas acerca de cómo denominarlo, aunque se hablaba de él como Semiconductor triode.[265] El 28 de mayo de 1948 se pasó un memorándum a dos departamentos y a 30 personas de los Laboratorios Bell para proceder a una encuesta sobre qué nombre darle. Vale la pena reproducirlo, pues ofrece indicios interesantes de cómo se veía el nuevo dispositivo:[266]

Recomendaciones del Comité para la Terminología de Semiconductor Triodes.

Semiconductor triode. Este se considera un nombre bastante bueno, al ser satisfactoriamente descriptivo, pero se preferiría un nombre más corto. El «triode» describe los tres elementos del dispositivo; si se añadiesen más elementos, podría ser, por ejemplo, un tetrode o un pentode. En línea con esta terminología, se puede denominar a un rectificador de contacto de un único punto, semiconductor diode.

Surface States triode. Este es de la misma clase del primer nombre sugerido antes; es descriptivo pero no es corto.

Crystal triode. La objeción a este nombre es que el término «cristal» se asocia habitualmente con los tipos piezoeléctricos.

Solid triode. Tiene la ventaja de la brevedad, y es descriptivo en el sentido de que se puede explicar el dispositivo con la física del estado sólido, y también de que el elemento activo es un sólido en lugar de los tubos de vacío o rellenos de un gas. Sin embargo, la palabra «sólido» normalmente también significa robusto, masivo, áspero o fuerte, términos que son contradictorios con las actuales características físicas de la unidad.

Iotatron. Este término transmite satisfactoriamente el sentido de un elemento pequeño, en contraste con el nombre anterior. Sin embargo, a la vista de los muchos dispositivos de vacío, o rellenos de gas, tales como thyratrons, dynatrons, transistrons, etc., carece de la propiedad distintiva que le diferenciaría de tales dispositivos.

Transistor. Este es una combinación abreviada de las palabras «transconductance» o «transfer» y «variator». Desde el punto de vista de la lógica, el dispositivo pertenece a la familia de los «variator» y posee la transconductancia o impedancia de transferencia de un dispositivo que tiene ganancia, de forma que esta combinación es descriptiva.

Tras presentar estos candidatos, el comité añadía los siguientes comentarios:

Si se adoptase un término general («transistor», por ejemplo) para toda la clase de dispositivos semiconductores, tendría el considerable mérito de proporcionar

términos descriptivos adicionales para subclases particulares. Como ilustración, podría haber algún día un «transistor 120B», que fuese un «tríodo de germanio», y un «transistor 196A», que fuese un «diodo de silicio», etc. Un tetrodo de germanio ya ha sido explorado con cierta promesa y es posible que según pase el tiempo aparezcan muchas otras variaciones.

A la vista de estas consideraciones, la recomendación del comité es que el dispositivo particular con el que hemos trabajado hasta ahora, esto es, el bloque de germanio con dos puntos de contacto, se denomine germaniun triode.

Los encuestados pensaron otra cosa y el nombre que se impuso fue el de transistor.

El transistor de contacto de Bardeen y Brattain desató una auténtica fiebre de comprobaciones, mejoras y discusiones acerca de sus posibilidades en los Laboratorios Bell. Y también la preparación de las correspondientes patentes: el 26 de febrero de 1948, la compañía presentó la solicitud de cuatro patentes para semiconductores amplificadores, incluyendo la original de Bardeen y Brattain («Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials»). También se deseaba patentar la idea de Shockley del «efecto campo», pero durante el proceso de investigación se descubrió que un desconocido físico e inventor polaco que había sido profesor de física en la Universidad de Leipzig entre 1910 y 1926, año en que emigró a Estados Unidos, Julius E. Lilienfeld, había patentado veinte años antes (28 de enero de 1930; patente sobre un «Method and apparatus for controlling electric currents») una idea parecida.

El 30 de junio, los Laboratorios decidieron anunciar los descubrimientos a la prensa. Una semana antes, Shockley había pedido al editor de Physical Review, John Tate, que publicase rápidamente tres breves artículos que le envió. Tate aceptó y se determinó que aparecerían en el número del 15 de julio, un tiempo record para la revista. Los dos primeros —«El transistor: un tríodo semiconductor», de Bardeen y Brattain (1948), y «La naturaleza de la corriente de salida en contactos en un punto de germanio», de Brattain y Bardeen (1948) — aún se consideran unos clásicos (junto a otro que apareció el año siguiente: Bardeen y Brattain 1949), mientras que el tercero, de Shockley y Gerald Pearson (1948), basado en los experimentos del efecto campo de Pearson, era más prescindible.

El anuncio público del día 30 se celebró en el auditorio de la sede de la compañía en Nueva York (West Street). En su discurso de presentación, Ralph Bown, el director de investigación de los Laboratorios, manifestó (Riordan y Hoddeson 1997: 164):

Lo hemos denominado Transistor, T-R-A-N-S-I-S-T-O-R, porque es un resistor o dispositivo semiconductor que puede amplificar señales eléctricas cuando son transferidas de una terminal de entrada a otra de salida. Es, si lo desean, el equivalente eléctrico de un tubo amplificador de vacío. Pero ahí se termina la similitud. No tiene vacío, ni filamento, ni tubo de cristal. Está formado completamente de sustancias frías y sólidas.

Este objeto cilíndrico que estoy sosteniendo es un Transistor. Aunque es una cosa un «poco pequeñita» puede —hasta una potencia de salida de alrededor de 100 milivatios y una frecuencia de unos 10 megaciclos— hacer exactamente lo mismo que un tubo de vacío, y algunas cosas únicas que el tubo de vacío no puede conseguir.

A continuación, Bardeen, Brattain y Shockley explicaron brevemente sus contribuciones, para después dejar paso a que Bown comenzase con las demostraciones. Al contrario de lo que se esperaba, la repercusión pública fue escasa. El New York Times dio la noticia el 1 de julio, en su columna periódica News of the Radio (página 46) (Eckert y Schubert 1991: 274-276):

Un nuevo aparato llamado transistor, con diversas aplicaciones en radio substituyendo a las válvulas de vacío, fue presentado ayer por primera vez en los Bell Telephone Laboratories de West Street 463 [...] Esa pieza se presentó incorporada a una radio que no contenía ninguna de las válvulas habituales hasta ahora. También se presentó incorporado a un sistema telefónico, y a otro de televisión, controlado a través de un receptor instalado en un sótano del edificio. En todos estos casos, el transistor ha sido empleado como amplificador, si bien se asegura que también puede utilizarse como oscilador, al producir y emitir ondas de radio.

Con el aspecto de un pequeño cilindro de metal de aproximadamente 1,5 cm. de longitud, el transistor no contiene vacío, rejillas, placa ni envoltura de cristal para protegerlo del aire. Funciona al instante y no precisa un periodo de calentamiento, ya que no se desarrolla calor alguno como sucede en las válvulas. Las partes activas de esta pieza consisten solo de dos filamentos delgados que discurren sobre un cuerpo de material semiconductor del tamaño de una cabeza de alfiler, conectado a una base de metal. La sustancia del soporte de metal amplifica la corriente inducida por una de las puntas, y la otra transmite la corriente así amplificada.

Como han señalado Riordan, Hoddeson y Herring (1999: S340), «durante las semanas que siguieron a la invención del transistor de contacto, Shockely se vio embargado por emociones encontradas. Aunque reconocía que el invento de Bardeen y Brattain había sido un magnífico “regalo de Navidades” para los Laboratorios Bell, le molestaba no haber desempeñado un papel directo en esa obvia innovación rompedora. “Mi alegría por el éxito del grupo fue atemperada por no ser uno de los inventores”, recordó un cuarto de siglo después [Shockley 1976], “Experimenté frustración de que mis esfuerzos personales, que habían comenzado ocho años antes, no hubiesen producido una inventiva significativa de mi parte”». Sin embargo, en lugar de desanimarse y abandonar definitivamente el campo, volvió con energía a él (durante los meses precedentes había estado trabajando en la teoría de dislocaciones en sólidos). Esa idea condujo finalmente (Shockley 1947, 1948) al transistor de unión (junction transistor; también se le denomina «transistor bipolar»), un dispositivo formado por tres áreas diferentes de materiales semiconductores dopados y dos uniones p-n que separan estas tres zonas. Básicamente, un transistor de unión tipo n-p-n funciona como amplificador de la manera siguiente: se coloca una delgada capa de material p entre dos regiones de material n, a modo de sándwich; una de las regiones n está muy dopada y es el «emisor», la otra región n menos dopada es el «colector» y entre ambas, la estrecha zona p que es la «base». Si la unión base-emisor se polariza en directa y la unión base colector en inversa, los huecos de la base llegan al emisor y los electrones del emisor llegan a la base donde una pequeña parte de ellos se recombina con huecos pero la mayoría pasa al colector, originándose un flujo notable de corriente del emisor al colector. En la segunda unión, el voltaje base-colector solo permite una pequeña corriente inversa. Variando la polaridad de la tensión aplicada a la base, puede activarse o desactivarse la corriente del colector

La primera demostración de un transistor de unión que funcionaba satisfactoriamente se realizó el 20 de abril de 1950. Fue una demostración para los directivos de los Laboratorios, no pública. Esta tardó más de un año en llegar, ya que hubo que perfeccionar el nuevo dispositivo. El 4 de julio de 1951 (un día muy significativo para los estadounidenses), de nuevo en el auditorio neoyorquino de West Street, como con el transistor de contacto tres años atrás, se presentó a la prensa el transistor de unión de Shockley. Ese mismo mes, Physical Review publicó un artículo de Shockley, Morgan Sparks y Gordon Teal (1951) en el que se daban detalles técnicos sobre el invento.[267]

En 1956, Shockley, Bardeen y Brattain recibieron el Premio Nobel de Física, «por sus investigaciones en semiconductores y el descubrimiento del efecto transistor». Este Nobel es el primero de los dos que ganó Bardeen (el segundo, como ya vimos, fue por la superconductividad).

El nuevo transistor superó con creces al de contacto. Amplificaba señales en factores de un millón o más, y consumía muy poca energía (podía funcionar con un décimo de voltio), lo que significaba que el calor emitido no constituía ningún problema, un detalle fundamental para aplicaciones como el emergente campo de los computadores-ordenadores digitales, que necesitan de miles de válvulas de vacío o de transistores en sus circuitos lógicos. No es sorprendente, por consiguiente, que el transistor de contacto no se impusiese en el mercado; únicamente lo hizo durante algún tiempo en aparatos de audición y equipos militares.

Y ya que he tocado este punto, el de la comercialización del transistor, diré algo más de él.

Pese a lo que, retrospectivamente, se pueda pensar hoy, en un mundo donde los transistores son omnipresentes, en sus inicios el transistor fue considerado prácticamente un sustituto de las válvulas de vacío, como quedaba patente en la reseña del New York Times. Y sin demasiado éxito, ya que compañías como RCA, General Electric, Sylvania o Philco (Philadelfia Storage Battery Company) continuaron utilizando válvulas: la venta de válvulas no alcanzó su pico hasta 1957, y no mostró un declive agudo hasta finales de la década de 1960. Fueron las Fuerzas Armadas estadounidenses las que salvaron inicialmente al transistor, las que se mostraron interesadas por el pequeño tamaño y escaso consumo energético de los transistores, que encajaba magníficamente con el programa de miniaturización de equipos militares que

comenzó a principios de la década de 1950. Entre 1955 y 1961, el Departamento de Defensa invirtió 66 millones de dólares en programas para desarrollar las posibilidades del transistor: entre el 35 por ciento y el 50 por ciento de toda la producción anual de semiconductores en Estados Unidos se destinó a uso militar durante los años 1955 a 1963 (Braun y Macdonald 1982: 80).[268] A esto hay que añadir las repercusiones que tuvo la decisión del presidente Kennedy en 1961 de establecer un programa espacial intensivo, con el propósito de «poner un hombre en la Luna» hacia 1970: dada la limitada potencia de los cohetes disponibles entonces en Estados Unidos, el peso transportado debía reducirse al mínimo, lo que significó que toda la electrónica tuvo que ser transistorizada (Orton 2004: 97). En uno de los artículos de un voluminoso número de la revista del Institute of Radio Engineers (Instituto de Radio Ingenieros) de Estados Unidos, publicado en mayo de 1962 y dedicado a celebrar el medio siglo de existencia del Instituto, un ingeniero de Thompson Ramo Wooldridge Inc., de Los Ángeles, Simon Ramo (1962: 1237), reconocía y explicaba esa conexión entre electrónica y fuerzas armadas:

En las últimas dos décadas, la influencia más importante en la profesión e industria electrónica ha sido el desarrollo y producción patrocinado por el gobierno. En años más recientes, los campos de los misiles guiados y la tecnología espacial se han convertido en las áreas más destacadas patrocinadas por los militares o las agencias gubernamentales surgidas en tiempos de paz. Es difícil que una organización que trabaje en el campo de la electrónica permanezca ajena, directa o indirectamente, a los programas nacionales espaciales o de misiles guiados.

Esto es particularmente cierto en todo lo que es nuevo. Los requisitos espaciales o de los misiles han empujado el arte tan rápidamente, y la obsolescencia tecnológica, ha sido tan rápida que han impedido que se alcance una base de productos estabilizados. El factor de novedad ha sido tan dominante que una gran parte de toda la industria electrónica parece haberse transformado, pasando de actividades de producción, para las que se habían fundado muchos de los grupos, a operaciones de investigación y desarrollo.

En el capítulo segundo ya traté de la penetración del Gobierno Federal

estadounidense en la industria electrónica nacional. Ahora solo quiero considerar la cuestión de los pros y los contras del hecho de que el presupuesto para I+D estadounidense, desde el final de la Segunda Guerra Mundial, dependiese tan fuertemente de las Fuerzas Armadas.[269]

Los pros son evidentes, subyacen en mucho de lo que se acaba de decir. En cuanto a los inconvenientes, algunos estudios señalan que la competitividad comercial estadounidense apenas se benefició del I+D militar. Análisis estadísticos (Griliches y Lichtenberg 1984), en los que se considera la relación existente entre inversiones privadas y federal en I+D y crecimiento de la productividad (uno de los índices del rendimiento económico), apuntan en la dirección de que las industrias con un porcentaje por encima de la media en inversiones privadas en I+D experimentaron durante parte de la segunda mitad del siglo XX un crecimiento de productividad también por encima de la media, mientras que no ocurrió lo mismo en las industrias con un porcentaje superior a la media de inversión federal —la mayor parte del cual fue militar— en I+D. Así, a mediados de la década de 1970, el retorno medio (otro índice de rentabilidad) para el I+D privado era del 33,9 por ciento, mientras que para el I+D federal era solamente del 0,7 por ciento. Si nos fijamos ahora en el número de patentes en disposición de ser adjudicadas, encontramos de nuevo datos que no favorecen al I+D de carácter militar. Al final del año fiscal de 1972, las Fuerzas Armadas estadounidenses disponían de un stock de 14.419 patentes que podían ser contratadas; más de la mitad de ellas (8.372) pertenecían a la Marina. Es interesante señalar que solamente 73 (es decir, el 0,9 por ciento) de esas 8.372 patentes estaban en proceso de ser adjudicadas. Por el contrario, el Departamento de Agricultura únicamente disponía de un número de patentes que correspondían al 17 por ciento de las que poseía la Marina, y, sin embargo, el ritmo con el que adjudicaba patentes en el mercado era 14 veces superior al de esta.

Son muchas las razones imaginables para explicar datos como los anteriores, algunas independientes de la nación a que se refieren, o del tipo de economía practicada, pero otras indudablemente vinculadas a las estructuras y relaciones, económicas y laborales, particulares de Estados Unidos. Me limitaré a mencionar una de las primeras, que considero particularmente importante y característica del medio militar. Por su propia naturaleza, la I+D militar está más preocupada por el desarrollo del producto que por el perfeccionamiento del proceso de producción. Dicho de otra manera: el número de copias de productos altamente elaborados (que son los sujetos a mecanismos de I+D) que las Fuerzas

Armadas necesitan es relativamente pequeño, al menos cuando se compara con las cantidades que se manejan en el mercado industrial civil; como consecuencia, los militares pueden tratar tales productos de una manera casi artesanal, prestando, en definitiva, no demasiada atención a los procesos de producción en serie (lo que se traduce en que solo una pequeña parte del presupuesto para I+D de Defensa se dedique a la mejora de la tecnología de la manufactura). Sin embargo, la producción en serie, la manufactura, es vital para el éxito comercial en el mercado civil. Y a esto habría que añadir, además, que la precisión de los productos que las Fuerzas Armadas requieren es tan elevada, que cada vez es más difícil encontrar aplicaciones de tales productos en el ámbito público. El Concorde es un buen y conocido ejemplo: este avión, que se desarrolló con financiación gubernamental, fue una maravilla desde el punto de vista tecnológico, pero al mismo tiempo es un fracaso económico (como demuestra el que ya no esté en servicio), necesitándose subsidios públicos para mantenerlo en operación. La Iniciativa de Defensa Estratégica promovida por el presidente Reagan acaso habría llevado, de haberse mantenido, a extremos mayúsculos semejante dinámica, especialmente si tenemos en cuenta que las estimaciones relativas al costo del proyecto no bajaban de los 500.000 millones de dólares, llegando a alcanzar los 1.870.000 millones de dólares (la guerra del Vietnam costó, de 1965 a 1972, del orden de 300.000 millones).[270]

CHIPS Y CIRCUITOS INTEGRADOS

La primera utilización del transistor en el ámbito civil fue, como se ha apuntado anteriormente, en aparatos para mejorar la audición. Gradualmente fueron introduciéndose en otros aparatos, como radios portátiles (a las que muchos todavía llamamos transistores; la primera radio «de bolsillo», la Regency, hizo su aparición en el mercado en las Navidades de 1954) y televisores. En 1955, Shockley abandonó los Laboratorios Bell para fundar su propia compañía en el área de la bahía de San Francisco. El «Shockley Semiconductor Laboratory» abrió sus puertas en febrero de 1956, reclutando un excelente grupo de profesionales. No tuvo, sin embargo, demasiado éxito, pero a la postre constituyó el germen que condujo al crecimiento de una zona en la que se agruparon diversas compañías tecnológicas en un lugar de California que terminó siendo conocido como «Silicon Valley», el «Valle del Silicio».

La utilización del transistor en circuitos presentaba problemas al tener que producir por separado los componentes del circuito —entre ellos los propios transistores— y tener luego que ensamblarlos. Este problema se manifestó con claridad en las máquinas de calcular electrónicas.

Hasta la llegada de los transistores y circuitos integrados, las máquinas de calcular utilizadas eran gigantescas agrupaciones de componentes electrónicos. Por ejemplo, durante la Segunda Guerra Mundial se construyó una de las primeras máquinas de calcular electrónicas: el Electronic Numerical Integrator and Computer (Computador Integrador Numérico Electrónico, también conocido por sus siglas inglesas, ENIAC). Tenía 17.000 tubos electrónicos, unidos por miles de cables, pesaba 30 toneladas y consumía 174 kilowatios. Podemos considerarlo el paradigma de la primera generación de computadores. En la década de 1950, con los transistores llegó la segunda generación: el primer computador surgido de la física electrónica del estado sólido fue el TRADIC (de Transistor Digital Computer), construido en 1954 por los Laboratorios Bell para la Fuerza Aérea estadounidense; utilizaba 700 transistores y podía competir en velocidad con ENIAC. Pronto fue superado por el Control Data CD 1604, que contenía 25.000 transistores, 100.000 diodos, y cientos de miles de resistores y capacitores. Precisamente, por el elevadísimo número de componentes que incluía y la subsiguiente dificultad de conexión, su producción se retrasó: se entregó a la Marina estadounidense en 1960 (en 1964 ya se habían fabricado 50 unidades). Y si se pretendía —una idea que surgió por entonces— utilizar estas máquinas, computadoras u ordenadores, para que guiasen un misil o un cohete a la Luna, lo que exigiría circuitos con 10 millones de componentes, ¿cómo producirlos y cómo incorporarlos a los cohetes y misiles?

La solución al problema se produjo en dos lugares y por dos personas diferentes: Jack Kilby (1923-2005) y Robert Noyce (1927-1990).[271]

En mayo de 1958, Kilby, que se había graduado en ingeniería eléctrica en la Universidad de Wisconsin, entró a trabajar en Texas Instruments, una compañía que hasta entonces se había centrado sobre todo en la geofísica, pero que en 1952 decidió que el futuro estaba en los transistores y en la miniaturización de componentes electrónicos. Pronto se preguntó qué pasaría si en lugar de tomar componentes diferentes y luego unirlos para formar un circuito, este estuviese hecho del mismo material en una misma pieza; de hecho, de un material semiconductor. En agosto de 1958, Kilby, que había fabricado circuitos con transistores tipo «meseta», resistores y capacitores sobre un cristal de germanio,

mostró su invento a los directivos de Texas Instruments y el 6 de febrero de 1959 solicitó varias patentes del producto: un circuito integrado.

El otro gran protagonista de esta historia fue Robert Noyce, un graduado (1953) del MIT y un excelente prototipo de algunos de los científicos-ingenieros que produjeron un mundo nuevo. «Tuvo éxito», ha señalado Thomas Reid (2001: 82), «como científico y como ingeniero [...] Pero lo tuvo más como emprendedor; de hecho, creó el molde para ese clásico fenómeno del cambio de siglo: el multimillonario de alta tecnología. Fue Bob Noyce quien primero demostró a los que negaban a Silicon Valley que un ingeniero inteligente podía convertir su talento tecnológico en riqueza sin límites». No en vano llegó a ser denominado «el alcalde de Silicon Valley».

Tras graduarse, Noyce trabajó para Philco, primero, y para el Shockley Semiconductor Laboratory después. Abandonó este en 1957 para fundar (en septiembre de ese año), con otros miembros de la empresa de Shockely —los «ocho traidores», Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Eugene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore y Sheldon Roberts, más el propio Noyce— «Fairchild Semiconductor». En una carta que Kleiner dirigió a Hayden Stone & Company en junio de 1957 —esto es, antes de que Fairchild Semiconductor se fundase—, con el propósito de conseguir recursos económcos para crear la nueva empresa, se detallaban algunas de las razones que condujeron a que los «ocho traidores» abandonasen la empresa de Shockley. Es relevante citar los pasajes pertinentes (Lécuyer y Brock 2010: 46): «Nuestra actual insatisfacción ha surgido principalmente de la confusa y desmoralizadora dirección de Shockley. Aunque una gran habilidad para reunir a semejante e inhabitualmente capaz grupo de técnicos como el que tenemos es sin duda útil, se necesita una buena habilidad administradora para utilizarlos de manera eficaz».[272] Pese a que reconocía que se habían realizado algunos cambios, estos eran «insuficientes para hacer que se elevara la moral hasta el punto de poder tener rápidamente éxito como organización productiva que obtenga beneficios».

Aquel mismo año Jean Hoerni inventó para Fairchild dos técnicas fundamentales, como son el dopado con oro y el proceso «planar», este último empleado inicialmente en la fabricación de transistores sobre una oblea de semiconductor, mejorando la fiabilidad y velocidad de conmutación del transistor. Pese a que el procedimiento fue reflejado por Hoeni en el libro oficial de notas de Fairchild el 1 de diciembre de 1957, y firmado por Noyce ese mismo día, la patente no se solicitó hasta el 14 de enero de 1959. Hoeni consiguió

fabricar el primer transistor «planar» (era del tipo n-p-n) que superaba en poder de amplificación y en robustez a su equivalente del tipo «meseta». Pero el proceso de producción se demoró un año; en 1961, Fairchild Semiconductor producía comercialmente los primeros chips.[273] El efecto de estos inventos fue enorme, por un lado estableció el silicio como material básico, por otro, el procedimiento planar impulsó el desarrollo de la industria electrónica y condujo a otra innovación, el circuito integrado.[274] Como se ha indicado anteriormente, la idea de crear un único dispositivo con todos los componentes y funciones de un circuito resultaba muy atractiva para los militares, y diversas compañías estaban persiguiendo este fin (entre otras, a la cabeza, Texas Instruments, con Kilby y su tipo de circuito integrado). Fairchild también, y fue Noyce quien fabricó el primer circuito integrado con tecnología planar, sobre una oblea de silicio. La patente se solicitó el 30 de julio de 1959, por consiguiente después que la de Kilby, aunque no fue concedida hasta 1961. Esta concesión condujo a diez años de litigio a Texas Instruments y Fairchild, por la idea de circuito integrado.[275] En 1968, Noyce dejó Fairchild para fundar, junto a Gordon Moore, Intel, donde lideró con Ted Hoff la invención del microprocesador, que generó una nueva revolución, la revolución microelectrónica (la National Academy of Sciences de Estados Unidos ha considerado al circuito integrado el «progenitor» de la «Segunda Revolución Industrial»).

Los avances clave que condujeron al chip y la tecnología planar quedan bien resumidos en palabras del propio Noyce (1977: 9): «A mediados de los años 50, los ingenieros aprendieron a definir la configuración superficial de los transistores por medio de la fotolitografía, y desarrollaron el método de la difusión de estado sólido para inyectar las impurezas que crean las regiones p y n. El procesamiento en bloque de muchos transistores sobre una delgada "oblea", seccionada a partir de un cristal grande de germanio o silicio, comenzó a desplazar la técnica pionera del procesamiento individual de los transistores. Los cientos de miles de transistores registrados con precisión, que podían fabricarse sobre una sola oblea, tenían aún que ser separados físicamente, ensamblados individualmente con cables finos en el interior de una cápsula protectora y posteriormente incorporados en circuitos electrónicos».

En resumen, cuando se iniciaba la década de 1960, se habían desarrollado técnicas con las que se formaban, sobre láminas de material semiconductor (silicio), circuitos electrónicos completos, de unos pocos milímetros cuadrados de tamaño (de esta manera los transistores dejaron de ser componentes

específicos que había que conectar a un circuito). En 1967, Jerry Merryman, James van Tassel y Kilby (quien en 2000, con Noyce ya fallecido, recibió el Premio Nobel de Física), los tres trabajando para Texas Instruments, ya habían creado un conjunto de circuitos integrados digitales capaces de ser utilizados en un ordenador y, con la disponibilidad que tenían de esos microchips, desarrollaron la primera calculadora electrónica de bolsillo (su solicitud final de patente no se produjo hasta el 21 de diciembre de 1972).

Junto a los anteriores hechos tecnocientíficos, es necesario añadir otros, de índole socioeconómica y política, referidos a Estados Unidos, donde, con la microelectrónica, nació esa Segunda Revolución Industrial. El primero, una variación más de un fenómeno ya comentado, que el Gobierno Federal suministró la mitad del dinero que la industria estadounidense empleó en I+D durante los primeros 16 años de existencia del chip, y que fue el mismo gobierno el que consumió toda la producción de circuitos integrados hasta 1964. Gracias a ese apoyo, compañías como Fairchild y Texas Instruments, y un cada vez mayor número de nuevas empresas, pudieron desarrollar las sofisticadas instalaciones de producción que necesitaban para producir los microchips. Hacia 1964, los precios de los circuitos integrados comenzaron a disminuir: en 1963 el precio medio era de 32 dólares, el año siguiente de 18,50, y otro año después de 8,33 y, en 1971, el precio medio era de 1,27 dólares.

Otro factor que contribuyó al extraordinario desarrollo y penetración de los circuitos integrados fue que llegó justo cuando las máquinas computadoras estaban comenzando a desarrollarse. Cuando Kilby y Noyce produjeron el circuito integrado, las computadoras-ordenadores estaban en el umbral de convertirse en el instrumento esencial para un enorme conjunto de empresas: bancos, compañías de seguros, sistemas públicos de Seguridad Social, etc. A finales de la década de 1950, solo unos pocos visionarios pensaban en la idea de un «ordenador personal», una computadora en cada casa. Los chips eran el elemento perfecto para implementar la matemática y lógica digitales que utilizan los ordenadores. El primer microprocesador, el INTEL 4004 (contenía 2.300 transistores en un solo chip) se comercializó en 1971. En 1975, la industria comenzó a producir una serie de microcircuitos de memoria que contenían 65.536 transistores, lo que significaba que almacenaban algo más de 16.000 bits de información. Tres años después, se disponía de microcircuitos con 258.000 transistores y 16 K bits, y en 1993 se lanzó el INTEL Pentium, un procesador que contenía 5,5 millones de transistores (a comienzos del siglo XXI la capacidad de memoria era de 256 M bits, con 1.000 millones de transistores

agrupados en una lámina de silicio no más grande que la palabra CHIP).

Así, el chip y el ordenador fueron de la mano, como el carro y el caballo o como la industria del petróleo y la del automóvil. Recurriendo de nuevo a las palabras del propio Noyce (1977: 7-8):

El advenimiento, casi simultáneamente, del ordenador digital con programa almacenado le abrió al transistor un gran mercado potencial. La conjunción entre un nuevo componente y una nueva aplicación generó un crecimiento explosivo de ambos. El ordenador fue el mercado ideal para el transistor y para los circuitos integrados de estado sólido, que el transistor trajo como consecuencia, mercado mucho más fecundo que el que podía haber encontrado en las aplicaciones tradicionales de la electrónica en el campo de las comunicaciones. Y es así, porque los sistemas digitales precisan un gran número de circuitos activos, en comparación con los sistemas dotados de amplificación analógica, como la radio. En la electrónica digital, un elemento determinado se halla en uno de estos dos estados: activado o desactivado, lo que depende de la entrada. Por muchos elementos que se conecten, la salida de los mismos continuará estando sencillamente activada o desactivada. La ganancia de la etapa individual es la unidad, de modo que, aunque se encadenen en cascada varias etapas, la ganancia seguirá siendo la unidad. Por otra parte, los circuitos analógicos requieren amplificación de la entrada. Como la ganancia de cada amplificador tiene un valor característico de 10, solo pueden conectarse en serie o cascada unas cuantas etapas antes de que se alcance el límite práctico de los niveles de tensión para elementos microelectrónicos. El sistema analógico no puede manejar, por tanto, la gran cantidad de microcircuitos que el sistema digital precisa; una calculadora de bolsillo contiene 100 veces más transistores que una radio o un televisor.

En ese mundo microelectrónico, hijo de la física cuántica y de la innovación tecnológica, complementado con otros desarrollos (por ejemplo, fibras ópticas), continuamos viviendo.

MICROSCOPIOS Y NANOTECNOLOGÍA

Entre los innumerables desarrollos que los microprocesadores han contribuido a hacer posible, se encuentra la denominada «nanotecnología», cuyo objetivo es el control y manipulación de la materia a una escala del orden de entre 1 y 100 nanómetros (1 nanómetro equivale a 10-9 metros). La nanotecnología, o nanotecnociencia, es más un conjunto de técnicas que una ciencia, pero aun así no se debe olvidar su dimensión científica, que se puede poner de manifiesto a través de Richard Feynman.

En una conferencia titulada «There's plenty of room at the bottom» («Hay mucho espacio al fondo»), que pronunció en la reunión anual de la American Physical Society el 29 de diciembre de 1959, Feynman alertó a los científicos sobre la posibilidad y el interés de trabajar en dimensiones mucho más pequeñas de las frecuentadas entonces.[276] «Quiero describir un campo», comenzaba su conferencia (Feynman 1960: 22), «en el que se ha hecho poco, pero en el que en principio se puede hacer mucho. Este campo no es exactamente como otros, en tanto que no nos dirá mucho sobre física fundamental (en el sentido de "¿Qué son las partículas extrañas?"), pero que es más parecido a la física del estado sólido en el sentido de que puede decirnos mucho de gran interés sobre los extraños fenómenos que tienen lugar en situaciones complejas. Además, un punto que es muy importante es que tendría un enorme número de aplicaciones técnicas. De lo que quiero hablar es del problema de manipular y controlar cosas en una escala pequeña». Las escalas que consideraba Feynman (1960: 34) llegaban a las atómicas: «No tengo miedo de considerar la cuestión final de si, en última instancia —en un futuro lejano—, podremos manipular los átomos de la forma en que queramos, ¡los mismísimos átomos, todo el camino hasta ellos! Qué sucederá si pudiésemos manipularlos uno a uno de la manera que quisiésemos (dentro de lo razonable, por supuesto; no podemos colocarlos, por ejemplo, de forma que sean químicamente inestables)».

Manipular cada átomo es lo que la nanotecnología ha logrado, lo que en realidad es su fundamento. Claro que para lograr esto fue necesario algo que Feynman también reclamó en su conferencia: mejores microscopios que los electrónicos por entonces disponibles, microscopios que permitieran observar muestras a una escala tal que permitiese avanzar en el estudio de las propiedades de los

materiales.

Los microscopios electrónicos de la época seguían el diseño pionero del físico alemán Ernst Ruska (1906-1988). Como explicó en la nota autobiográfica que preparó al recibir el Premio Nobel (con bastante, y poco explicable, retraso: lo obtuvo en 1986), «estudié electrónica en la Escuela Técnica de Múnich, estudios que comencé en el otoño de 1925 y que continué dos años después en Berlín. Recibí mi entrenamiento práctico en Brown-Boveri & Co en Mannheim y Siemens & Halske Ltd en Berlin. Mientras aún era un estudiante en la Escuela Técnica de Berlín, comencé mi relación con la tecnología de alto voltaje y de vacío en el Instituto de Alto Voltaje, cuyo director era el profesor Adolf Matthias. Bajo la tutela directa del doctor Max Knoll y junto a otros estudiantes de doctorado trabajé desarrollando mejoras para los osciloscopios de rayos catódicos. Por un lado, mis intereses residían principalmente en el desarrollo de materiales para fabricar instrumentos de vacío según los principios de construcción; por otro, en continuar siguiendo clases teóricas y realizar experimentos prácticos sobre el comportamiento de haces de electrones».[277] En aquellos estudios y trabajos, Ruska debió conocer la dualidad onda-partícula que había introducido Louis de Broglie, que significaba que la teoría óptica podía aplicarse a los electrones, partículas pero también ondas según la física cuántica. Los electrones, por otra parte, tenían propiedades que, en circunstancias apropiadas, les hacían aventajar a los fotones de la luz: si se aceleraban a energías lo suficientemente elevadas, tendrían, como ondas, longitudes de onda que les dotarían de un poder de observación (resolución) y penetración en una muestra mayores que la de los que se obtenían con la luz en los microscopios ópticos. A finales de la década de 1920, produjo sus primeros trabajos científicos, en realidad una tesina y una tesis de diplomatura para la Escuela Técnica de Berlín (Ruska 1929, 1930), ambas relacionadas con la demostración matemática y experimental de la teoría que avanzó Hans Busch (1927) sobre el efecto de un campo magnético en una bobina por la que pasa una corriente eléctrica y que se utiliza como una lente electrónica. Ahí residía el principio fundamental del microscopio electrónico. Este, en forma de columna, está formado por una fuente de electrones; el haz de electrones producidos —acelerados para que tengan energías elevadas (habitualmente entre 50 y 200 keV)— pasa entonces por el eje de diversas bobinas, que alineadas con el eje de la columna y dispuestas en las posiciones adecuadas a lo largo de aquella, alimentadas con el campo eléctrico correcto, actúan como lentes condensadoras, lente objetivo y lente proyectora (desempeñando, respectivamente, funciones análogas al colimador, objetivo y ocular del microscopio óptico), concentrando y

dirigiendo el haz hacia la muestra que se desea observar y proporcionando un diagrama de difracción o una imagen de la misma. En el caso de un microscopio electrónico de transmisión — el que produjo Ruska—, el haz de electrones atraviesa la muestra formando una imagen sobre una pantalla fluorescente o una película fotográfica.[278]

En 1931, con la ayuda del ingeniero eléctrico Max Knoll, Ruska construyó un prototipo de microscopio electrónico de transmisión (Ruska y Knoll 1931); dos años más tarde conseguían superar la resolución que se podía alcanzar con los mejores microscopios ópticos (Knoll y Ruska 1932). El primer microscopio realmente utilizable lo construyó en 1938 Eli Franklin Burton junto con sus colaboradores Cecil Hall, James Hillier y Albert Prebus, en la Universidad de Toronto. Fue, sin embargo, Siemens —que contrató a Ruska— quien fabricó en 1939 el primer microscopio comercial.

Los microscopios que superaron a los electrónicos, los que reclamaba Feynman, llegaron en 1981, gracias al trabajo de un grupo de físicos, encabezados por Gerd Binning y Heinrich Rohrer que trabajaban en los laboratorios de IBM en Zúrich. Se trata del microscopio de efecto túnel (un efecto netamente cuántico), instrumento que puede tomar imágenes de superficies a nivel atómico; por primera vez se podían «ver» los átomos. Como es habitual en una empresa, las patentes precedieron a la primera publicación; esta, en la que se mostraban las primeras imágenes obtenidas mediante microscopía de efecto túnel, apareció en 1982 (Binning, Rohrer, Gerber y Weibel 1982). Sin este tipo de microscopía, la nanotecnología sería todavía un sueño borroso, apenas definido, como lo era cuando Feynman pronunció su famosa conferencia.

El Premio Nobel de Física que, como indiqué, obtuvo Ruska en 1986, fue compartido con Binning y Rohrer. La mitad fue para Ruska, y un cuarto para los otros dos galardonados.

MÁSERES Y LÁSERES

Aún no he mencionado —aunque cronológicamente precedieron a algunos de los desarrollos anteriores— al máser y al láser, acrónimos, respectivamente, de microwave amplification by stimulated emission of radiation (amplificación de microondas mediante emisión estimulada de radiación) y de light amplification by stimulated emission of radiation (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).[279]

Desde el punto de vista de la teoría, estos instrumentos-procedimientos para amplificar ondas de la misma frecuencia (longitud de onda) tienen como base el contenido de dos artículos de Einstein (1916 b, c) y su descubrimiento de la emisión estimulada. Sin embargo, su realización práctica, con todos los nuevos elementos teóricos y experimentales que ello conllevó, no llegó hasta la década de 1950. Los responsables de este logro fueron, de manera independiente, los físicos del Instituto Lebedev de Física de Moscú, Aleksandr M. Prokhorov y Nikolai G. Basov, y el estadounidense Charles Townes, de la Universidad de Columbia, Nueva York (los tres compartieron el Premio Nobel de Física de 1964). Mención especial debe hacerse también a Joseph Weber, más recordado por sus investigaciones sobre radiación gravitacional (ya nos apareció en ese campo). Poco después de incorporarse a la Universidad de Maryland en 1951, Weber analizó la posibilidad de obtener una emisión estimulada a partir de una inversión de población electrónica (trataré de esta idea más adelante). Nadie había pensado en producir una inversión de población en la forma que lo hizo él, que también se dio cuenta de que la radiación sería coherente; no obstante, y al contrario que Townes, no pensó que se podría construir un aparato que generase esa radiación. Presentó sus ideas en una conferencia que tuvo lugar en 1952, apareciendo publicadas el año siguiente (Weber 1953).[280]

En mayo de 1952, durante una conferencia sobre radio-espectroscopia en la Academia de Ciencias de la URSS, Basov y Prokhorov describieron el principio del máser, aunque no publicaron nada hasta dos años después (Basov y Prokhorov 1954). Y no solo describieron su principio, sino que también Basov construyó uno como parte de su tesis doctoral, unos pocos meses después de que Townes hiciese lo propio.

Merece la pena resumir cómo Townes llegó por su parte a la misma idea del máser, ya que ilustra acerca de lo muy diversos que pueden ser los elementos que forman parte de los procesos de descubrimiento científico. Y lo primero que hay que destacar es lo importante que fue para él los trabajos que realizó durante la Segunda Guerra Mundial para desarrollar el radar, mientras trabajaba en los Laboratorios Bell, a los que se había incorporado en 1939. Utilizaré sus propias palabras (Townes 1999: 39-40):

Me sumergí en el trabajo del radar. De dos maneras, resultó ser una época útil para mí. Una fue directa y la otra indirecta. Los que trabajaban en los Laboratorios Bell y también los del Radiation Laboratory del MIT, desarrollaron el invento británico de los magnetrones potentes, cuyos pulsos de señales hicieron posible el radar. Los americanos se dedicaron entonces a conseguir aún mayor potencia, longitudes de onda más cortas, mayor precisión y sensibilidad. Nuestro primer sistema de navegación y bombardeo utilizaba magnetrones de longitud de onda de 10 centímetros. Pero los Laboratorios Bell y los militares estaban trabajando intensamente en la dirección de longitudes de onda más cortas. La meta era mejorar la direccionalidad y la sensibilidad, a la vez que se pudiese utilizar antenas mucho más pequeñas, una consideración muy importante cuando se trataba de instalar un radar en un avión. El fracaso de no producir alguno de los sistemas de bombardeo guiados por radar que desarrollamos supuso para mí un disgusto permanente. Nuestro primer sistema funcionaba bien en los 10 centímetros, y [los militares] dijeron que era un magnífico logro, pero ¿qué tal si nos dedicamos a uno de 3 centímetros? Cuando lo conseguimos, nos dijeron que trabajásemos en un sistema de 1,25 centímetros. Ese desplazamiento continuo de objetivos me causó tal frustración que en un momento pensé que debería abandonar, tal vez convirtiéndome en ayudante técnico del general Joseph Stilwell, que entonces se encontraba en China, o ir a algún otro lugar donde pudiera contribuir directamente [a la guerra].

Pero permanecí allí, y el proyecto del radar de 1,25 centímetros llegó a ser un episodio en mi desarrollo como físico.

La razón de ese desarrollo como físico, se debió a que al intentar diseñar ese radar y revisar la bibliografía relacionada, descubrió que apenas existían trabajos

sobre la absorción de microondas en gases moleculares; uno de ellos era el de David Dennison y George Uhlenbeck (1932), de la Universidad de Michigan, quienes en sus trabajos habían predicho que la molécula de amoniaco debería absorber microondas de longitud de onda próximas a 1 centímetro. Claud Cleeton y Neil Williams (1934), también de la Universidad de Michigan, se dedicaron a comprobar esa predicción, consiguiendo demostrar que cuando se hacían pasar microondas a través de un gas de amoniaco, se producía un pico en la absorción en la longitud de onda de 1,25 centímetros. Como veremos enseguida, el máser que Townes produjo fue de amoniaco.

Al término de la guerra, Townes decidió que quería volver a dedicarse a la física, abandonando los proyectos científico-tecnológicos dirigidos a un fin particular que era lo que predominaba en los Laboratorios Bell. Su decisión no fue aceptada de buen grado por sus jefes. «Mi determinación de regresar a la física», recordó (Townes 1999: 43), «no me hizo popular. Un amigo me dijo que uno de los vicepresidentes pesaba que me había convertido en un buen ingeniero, demasiado bueno para volver a dedicarme a la física. “Has molestado a mucha gente porque estás hablando de lo que querrías hacer. Debes hablar de lo que es bueno para la compañía”. Los Laboratorios Bell eran una soberbia organización, pero este tipo de presión era exactamente por lo que no quería dedicarme a la industria». Para apoyar su deseo, Townes trató de explicar a sus jefes por qué era interesante dedicarse a la espectroscopía de microondas, un tema en principio «científico», preparando un informe cuyo primer párrafo decía (Townes 1999: 43-44):

La radiación de microondas se ha extendido ahora a longitudes de onda tan cortas que se solapa con una región rica en resonancias moleculares, donde la teoría mecano-cuántica y las técnicas espectroscópicas pueden ayudar al radio-ingeniero. Las moléculas resonantes pueden proporcionar algunos elementos de los circuitos de futuros sistemas que utilicen ondas electromagnéticas inferiores a 1 cm. Se pueden superar muchas de las dificultades de fabricación de los elementos de los circuitos convencionales para longitudes de ondas muy cortas utilizando moléculas, elementos resonantes que suministra la naturaleza en gran variedad y con la reproducibilidad inherente a la estructura molecular.

Y a continuación, esbozaba formas en que la espectroscopía de microondas y las resonancias moleculares podían aplicarse a la detección de señales, control y atenuación de fase y otros usos (entre los que no se encontraba nada que pudiese anticipar la idea del máser o el láser).

Aquel informe convenció a la dirección de los Laboratorios para que dejasen a Townes dedicarse a la espectroscopía molecular, aunque no lo suficiente como para que se contratara a algún físico que le ayudase. Esta situación contribuyó a que Townes abandonase finalmente los Laboratorios Bell. Durante la guerra, había interaccionado frecuentemente con físicos del Radiation Laboratory de la Universidad de Columbia, donde, desde su creación durante la guerra, se estaba trabajando también en magnetrones y radares. En una reunión que se celebró en el Brookhaven National Laboratory en 1947, Townes coincidió con Isidor Rabi, de Columbia, y aunque este no entendió bien cuál era el interés de las investigaciones de Townes, le ofreció unirse a su grupo. Este aceptó y el 1 de enero de 1948 se convirtió en profesor asociado del Departamento de Física de la Universidad de Columbia —su primer empleo universitario— con un sueldo, 6.000 dólares al año, algo inferior al que recibía en los Laboratorios Bell.

Al igual que otras instituciones, el Radiation Laboratory de Columbia continuó recibiendo dinero de los militares después de la contienda, lo que le suponía una fuente segura de ingresos, dedicando el 80 por ciento de su presupuesto al desarrollo de tubos que generasen microondas. En la primavera de 1950, Townes organizó para la Oficina de Investigación de la Marina un comité asesor para considerar nuevas formas de generar microondas inferiores al centímetro, rango cuyas posibilidades le interesaba explorar al ejército; las de 1,25 cm, en las que tantas esperanzas había puesto, tenían el problema de que su poder de penetración en la atmósfera era muy pequeño, se disipaban enseguida.

El 26 de abril de 1951, haciendo tiempo en el Parque Franklin, de Washington D. C., antes de asistir a una reunión del Comité que la Marina había organizado para tratar sobre las ondas milimétricas, al reflexionar sobre por qué no avanzaba el proyecto, a Townes se le ocurrió la idea que conduciría al máser, al considerar que, en lugar de intentar construir pequeños resonadores que produjesen ondas milimétricas, debería utilizar de alguna manera las resonancias moleculares que suministra la naturaleza, una idea que, de hecho, ya había manejado en su informe a los Laboratorios Bell. Veamos cómo describió aquellos momentos en una de sus publicaciones (Townes 1995: 18):

No veía cómo se podrían preparar los resonadores necesarios y construir las delicadas estructuras con la precisión adecuada, y disipar en ellas la potencia necesaria. Había estado jugando con la posibilidad de utilizar moléculas o átomos como resonadores. Claramente, para frecuencias muy elevadas, esta era la única forma de hacerlo, ¿pero cómo? Entonces, de repente, me di cuenta de la posibilidad. Acaso el trabajo que habían realizado Purcell y Ramsey en Harvard sobre la inversión de poblaciones estaba en el fondo de mi mente. De cualquier manera, me di cuenta de que existía una forma de producir amplificación en moléculas y átomos, evitando el equilibrio termodinámico. También recordé una conversación reciente con el físico alemán Paul, que había desarrollado una técnica de haces para obtener grandes números de moléculas o átomos en un único estado. En el reverso de un sobre anoté rápidamente una forma posible de obtener un oscilador de alta frecuencia. Parecía difícil, y tardé unos pocos meses antes de ser capaz realmente de hacer algo con ello.

Para producir el primer máser necesitó algo más que unos pocos meses, además de la ayuda de un par de colaboradores: Herbert J. Zeiger, un joven doctor que había estado trabajando con Rabi y tenía experiencia en las técnicas de haces moleculares, y un doctorando, James P. Gordon. El primer máser llegó en 1954 utilizando un gas de moléculas de amoniaco (Gordon, Zeiger y Townes 1954, 1955). Tal y como predecía la teoría, las oscilaciones producidas por el máser se caracterizaban no solo por su alta frecuencia y potencia sino también por su uniformidad (radiación monocromática) y direccionalidad. El máser, en efecto, produce una emisión coherente de microondas; esto es, radiación altamente concentrada, de una única longitud de onda. Básicamente, su razón de ser teórica es la siguiente.

Los sistemas atómicos, moleculares y los sólidos presentan una serie de niveles (estados) de energía para sus electrones. Por sencillez, consideramos que los electrones del sistema solo tienen dos niveles, el E1 y el E3 (este de mayor energía), que están poblados por el número de electrones que se corresponde con el estado de equilibrio dinámico. Un electrón del nivel E3 puede perder parte de esta energía y ocupar el nivel E1, realizando una transición en la que se emite un fotón de energía E3 - E1 = hν3, en un proceso radiativo denominado «emisión espontánea», en el que la radiación emitida proviene del sistema. Pero si se le

comunica energía al sistema, mediante radiación electromagnética (fotones) de energía E3 - E1, se «estimula» la emisión, desde el estado electrónico E3, de un fotón de energía hν3, de manera que se ha proporcionado un fotón al sistema pero se han obtenido dos. Pero para que un proceso similar al descrito tenga lugar sin que la radiación emitida sea absorbida por los electrones del nivel E1, que accederían así al nivel E3, es necesario que en el nivel E3 haya muchos electrones, que exista una «inversión de población», y que los electrones transiten a un tercer nivel E2 (de energía menor que E3 y mayor que E1) que esté muy poco poblado, obteniéndose así una radiación amplificada —una señal de frecuencia— de energía E3 - E2 = hν2. Si esta señal de frecuencia ν2 está en la región de las microondas, se tiene un máser, si se encuentra en el rango del visible, se tendrá un láser.

Por las razones explicadas antes —su conexión con los trabajos encaminados a desarrollar radares— el máser se inventó primero, pero antes incluso de que empezasen a proliferar, algunos físicos comenzaron a intentar extender su idea a otras longitudes de onda. Entre ellos se encontraba el propio Townes (también Basov y Prokhorov), quien a partir del otoño de 1957 inició trabajos para ir desde las microondas a la luz visible, colaborando con su cuñado, Arthur Schawlow, un físico de los Laboratorios Bell. Fruto de sus esfuerzos fue un artículo básico, en el que mostraban cómo se podría construir un láser, al que todavía denominaban «máser óptico» (Schawlow y Townes 1958). No está de más mencionar que los abogados de los Laboratorios Bell, para los que trabajaba Schawlow y con los que Townes tenía un contrato de asesor, pensaron que la idea del láser no tenía interés suficiente como para ser patentada; únicamente lo hicieron ante la insistencia de Townes (Schwalow y Townes 1960).

La carrera por construir un láser se intensificó a partir de entonces. Aunque la historia posterior no siempre ha sido lo suficientemente clara en este punto, el primero que tuvo éxito fue Theodore Maiman, de los Hughes Research Laboratories de Malibu (California), que consiguió poner en funcionamiento un láser de rubí el 16 de mayo de 1960.[281] Maiman envió a la entonces recién creada Physical Review Letters un manuscrito con sus resultados, pero su editor, Samuel Goudsmit, lo rechazó como «solo otro artículo sobre el máser». En su lugar, Maiman recurrió a Nature, en cuyo número del 6 de agosto de 1960 consiguió publicar el resultado de su trabajo (Maiman 1960). Poco después, Schawlow anunciaba —en Physical Review Letters— que había puesto en funcionamiento otro láser, también de rubí (considerablemente más grande y potente que el de Maiman) junto a cinco colaboradores (Collins, Nelson,

Schawlow, Bond, Garret y Kaiser 1960). Habida cuenta de estos hechos es cuestionable que fuese Schawlow quien recibiese en 1981 el Premio Nobel (compartido con Nicolas Bloembergen y Kai Siegbahn) aunque formalmente fuese por su contribución (y la de Bloembergen) al desarrollo de la espectroscopia láser.[282]

Si el máser fue bien recibido, el láser lo fue más aún, especialmente por el Departamento de Defensa estadounidense. A partir de la década de 1960, este departamento del Gobierno Federal desplegó un amplísimo apoyo a la investigación relacionada con las fuentes de luz coherente. La idea era utilizar esta luz intensa y altamente direccional como instrumento de detección, guía o localización, e, incluso, como arma; deseos todos estos que en el futuro la Iniciativa de Defensa Estratégica del presidente Reagan mantendría en grado superlativo. Tanto la Marina como la Fuerza Aérea o el Ejército de Tierra esperaban poder incorporar el láser a sus respectivos arsenales; ello llevaba, obviamente, a que se necesitasen láseres de energías, longitudes de onda, eficiencias y tamaños muy dispares, lo que, a su vez, significó que se tuviese que prestar gran atención a disciplinas como la ciencia de los materiales, espectroscopía o química y física del estado sólido.[283] La Oficina de Investigación Naval, por ejemplo, firmó contratos con IBM para que esta estudiase el mecanismo de emisión de luz en semiconductores, y con la Northeastern University, para investigar el almacenamiento energético en diodos emisores de luz. Los científicos que se dedicaron en el Watson Research Center de IBM a estudiar la fabricación de cristales de arseniuro de galio tipo-n dopados con silicio, germanio, selenio, telurio y estaño, investigaciones sin las cuales no cabe pensar en una gran parte de la actual microelectrónica y optoelectrónica, lo estaban haciendo a instancias de una agencia militar.

Dejando aparte los usos militares, los máseres han demostrado su utilidad como amplificadores de bajo ruido en radioastronomía, un campo muy querido por Townes, y comunicaciones espaciales, y como osciladores en «relojes atómicos» que poseen una estabilidad de frecuencias extraordinaria. No hay que olvidar tampoco que se han detectado máseres naturales en nubes interestelares situadas en Sagitario y en la región denominada W49 (Townes 1995: 88-107; McGrath, Goss, De Pree 2004). En cuanto a los láseres, sus aplicaciones son innumerables; en su autobiografía, esto es, prácticamente cuando se iba a extinguir el siglo XX, Townes (1999: 4-6) gozaba mencionando algunas:

El aparato que determinó la distancia a la Luna era un láser de medio tamaño. Los trenes que cruzan por debajo de la Bahía de San Francisco, lo hacen en tubos subterráneos que siguen un camino determinado con un láser [...] Los láseres más pequeños son tan minúsculos que no se pueden ver sin un microscopio —se pueden construir miles en chips de semiconductores como los que forman los corazones de las computadoras (de hecho, antes de que pase mucho tiempo, puede que algunas computadoras utilicen luz de láseres en la forma que ahora las computadoras usan impulsos eléctricos). A unos 75 kilómetros de mi despacho en la Universidad de California en Berkeley, está el Lawrence Livermore National Laboratory, que posee algunos de los láseres más potentes que existen en la actualidad. Se ha preparado un conjunto de diez láseres, colectivamente denominados NOVA, de manera que los haces que producen converjan en un lugar del tamaño de la punta de un alfiler. Los propios láseres son aparatos inmensos que se extienden por más de 122 metros en un corredor de poderosas bobinas eléctricas, instrumentos ópticos y placas de cristal de 50 centímetros de espesor, de donde salen los rayos laser. Al converger, sus haces de luz casi instantáneamente (literalmente, en unas pocas diezmillonésimas de segundo) crean temperaturas de muchos millones de grados. Esas energías tan intensamente concentradas son esenciales para experimentos que puedan demostrar a los físicos cómo crear las condiciones para la fusión nuclear [...]

En contraste con el poder e intensidad que los rayos láser han conseguido, los científicos también han encontrado que un haz débil de rayos láser dirigido por un microscopio puede mover suavemente pequeñas partículas, incluyendo incluso los orgánulos dentro de las células vivas [...] Agencias que controlan la polución del aire pueden saber instantáneamente, lo sucio que está el aire sobre toda la extensión de una ciudad, simplemente comparando las formas en que se absorben haces de láseres de colores diferentes [...] Los láseres constituyen un medio de comunicación insuperable. Un rayo láser puede, en principio, transportar toda la información que está pasando ahora mismo entre todas las personas y computadoras del mundo. Las señales de todas las líneas telefónicas, todas las emisoras de televisión y de radio, todo lo que se dice, toda la música y toda la información digitalizada, podría empaquetarse en un único haz de rayo láser. Esta posibilidad aún no se ha alcanzado, pero estamos en la dirección apropiada para conseguirlo [...]

Decenas de millones de americanos tienen láseres en sus casas, y muchos los tienen en sus coches, láseres que producen música. La información en un disco

compacto (CD) se graba con un rayo láser, y láseres dentro de reproductores de CD leen los sonidos codificados digitalmente.

Como vemos, los logros de los láseres, y las esperanzas que se depositaban en ellos, no conocían, no conocen, límites. De hecho, en los menos de tres lustros que han transcurrido desde que Townes escribió las anteriores líneas, mucho de lo que decía ha sido ampliamente superado.

Más específicamente, algunos momentos importantes en las aplicaciones del láser han sido los siguientes: (1) 1961, Charles Campbell y Charles Koester realizaron la primera operación de cirugía que utilizó un láser (con uno de rubí se destruyó un tumor en la retina de un paciente); (2) 1974, se vendió el primer producto, un paquete de chicles, en el que un escáner leía mediante un láser un código de barras (la idea del código de barras se debe a Bernard Silver y Norman Woodland, que la patentaron en 1948); (3) finales de la década de 1970, Philips y Sony comenzaron a desarrollar pequeños discos de plástico de 12 centímetros de diámetro (discos compactos, o CDs) que albergaban, digitalizada, música (las minúsculas muescas en el disco que contienen la música digitalizada, se realizan con láseres; en 1982 se puso a la venta el primer CD musical: el álbum 52nd Street del rockero Billy Joel); (4) a mediados de la década de 1990, la capacidad del CD, que almacena poco más de 70 minutos de música, se amplió con la introducción del DVD (digital versatile disc o digital video disc), que puede albergar una película de cine; la diferencia con el CD reside en la longitud de onda del láser: la utilizada para «escribir» y leer un DVD es mucho más pequeña: 650 nanómetros para un DVD frente a los 780 para un CD (1 nanómetro =10-9 metros); (4) 2009, aparece un nuevo tipo de disco —desarrollado por un conjunto de compañías, lideradas por Sony y Philips— para almacenar información, el Blu-ray disc (BD), que puede albergar hasta 50 gigabits (1 gigabit es igual a 109 bits), suficiente como para almacenar una película a una resolución extremadamente alta; la longitud de onda del láser asociado a un BD es de 405 nanómetros, correspondiente a la longitud de onda de la parte azul del espectro electromagnético, de ahí su nombre de rayo (en realidad, láser) azul, blue ray (la e final no se mantuvo porque en algunos países no se aceptan solicitudes de patentes que propongan para nombres comerciales palabras comunes); hasta entonces los láseres eran sobre todo de radiaciones de longitudes de onda más largas, en el extremo del rojo o del infrarrojo (al DVD se le ha denominado a veces «láser rojo»).[284]

4

Y LA FÍSICA CAMBIÓ EL MUNDO

Nuestra generación, si no quiere quedar a espaldas de su propio destino, tiene que orientarse en los caracteres generales de la ciencia que hoy se hace, en vez de fijarse en la política del presente, que es toda ella anacrónica y mera resonancia de una sensibilidad fenecida. De lo que hoy se empieza a pensar depende lo que mañana se vivirá en las plazuelas.

JOSÉ ORTEGA Y GASSET (1923; 2005: 571)

No es preciso tener conocimientos profundos de la historia de la humanidad para saber cuánto ha cambiado la vida de los humanos desde que nuestra especie, homo sapiens —la última, y única que ha sobrevivido, de los homínidos— se estableció como tal. Y el papel que la tecnología y la ciencia han desempeñado en esos cambios. Recordemos, por ejemplo, lo que significó la invención de la agricultura y la domesticación de animales (ganadería), que convirtió a los humanos de cazadores-recolectores nómadas en sedentarios agricultores, transición que se profundizó con la invención de artilugios tecnológicos como el arado o la noria, que permitió irrigar los huertos; la invención de la rueda del alfarero permitió fabricar recipientes de distintas formas y tamaños, destinados al almacenamiento del agua, los granos y las harinas, mientras que la construcción de hornos cubiertos hizo posible aumentar la temperatura de la combustión hasta los 1.000 grados centígrados, lo que permitió la fabricación de ladrillos, más adecuados para la construcción de edificios. En otros dominios, tenemos ejemplos tan distinguidos como la aguja magnética, la pólvora, el papel o la imprenta, a los que se podría añadir el ábaco para realizar cálculos, la palanca para desplazar los cuerpos, el plano inclinado para facilitar la carga y

descarga, la cuña para dividir los troncos, la polea para levantar y bajar cargas, el tornillo para mantener unidas dos piezas, y la asociación del eje y la rueda para transportar cargas.

Como vemos, los albores de la civilización están asociados indisolublemente a la invención tecnológica. Sin ellos, no habría surgido la ciudad-estado, un centro de poder con estructuras administrativas de una cierta complejidad, que permitió que se almacenasen excedentes que se podían conservar, facilitando la aparición de grupos dispensados de tareas en las que, en el pasado, se centraba la actividad de prácticamente todos sus habitantes, la producción de alimentos, grupos de funcionarios, sacerdotes y soldados, diferentes de otros necesarios, como los artesanos o los sanadores (médicos). Y de la ciudad-estado se pasó a estructuras político-administrativas más extensas, como los estados-naciones o los imperios.

La técnica, la tecnología, ha dominado durante una buena parte de la historia de la humanidad su cambio, su desarrollo, pero el establecimiento de la ciencia moderna, en especial a partir de los siglos XVI y XVII (la época de la Revolución Científica), fue modificando la relación entre ciencia y tecnología —la pareja que constituye, por decirlo de alguna manera, «la mano que mece la cuna»—, en lo que se refiere al papel que ambas desempeñan en el desarrollo de la civilización, un papel que se acrecentó, sobre todo, a partir del siglo XIX, la centuria de la «medicina científica» —a la cabeza de esta, la fisiología—, la física del electromagnetismo y la química orgánica. Desde entonces, y pese a que, como en el pasado lejano, se den numerosos ejemplos en los que la invención tecnológica tuvo la primera palabra, vivimos en un mundo en el que esas «primeras palabras» con gran frecuencia han pasado a depender de la investigación científica.

La física, la rama de la ciencia a la que está dedicado el presente libro constituye un magnífico ejemplo de las consideraciones anteriores. No cometeré el imperdonable error de pensar que la «vida», —entendiendo ahora con este término todo lo que afecta a los humanos— del siglo XX y lo que llevamos del XXI, lo que es esa «vida» en la actualidad y cómo se transformó a lo largo de ese periodo, se deba únicamente a la física. ¿Cómo errar tan torpe y gravemente en la centuria del ADN, de la omnipresente química y de los nuevos entes y algoritmos matemáticos? Aun así, lo diré claramente: considero que ha sido la física la principal responsable de los profundos, rápidos e irreversibles cambios que han tenido lugar, cambios sociales, económicos y políticos. A argumentar que así ha sido, está dedicado este capítulo final.

LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN

Si miramos hacia atrás, a cómo vivíamos hace unos veinte o treinta años, enseguida nos damos cuenta de que el gran cambio que ha tenido lugar se ha producido en el ámbito de las comunicaciones. La presencia, la omnipresencia habría que decir mejor, de teléfonos móviles e Internet constituye un elemento que afecta profunda y constantemente a nuestras vidas y al conjunto de la sociedad. Enviamos y recibimos todo tipo de informaciones, con una celeridad y en cantidad tal como nunca antes habíamos imaginado. Esta facilidad e inmediatez de comunicaciones hace que se pueda decir, apropiadamente, que el mundo se está convirtiendo —¿se ha convertido ya?— en una Aldea Global. Poderes que hasta hace poco estaban localizados, como el económico, se diluyen —o esconden— en el ciberespacio, con las consecuencias que ello conlleva para las estructuras nacionales tradicionales. Las «redes sociales», formadas en torno a sistemas como Facebook o Twitter, pueden utilizarse para convocar con facilidad, a través de teléfonos móviles y otros aparatos, a elevados números de personas, en manifestaciones que no es imposible que conduzcan, o que al menos contribuyan, a movimientos político-sociales revolucionarios, como revela la denominada «Primavera árabe» que produjo importantes cambios políticos en países como Túnez y Egipto. Si hay ocasiones en las que las innovaciones tecnológicas muestran su poder, una de ellas es ciertamente a través de las que se han producido a partir de finales del siglo XX en el mundo de las comunicaciones.

Pues bien, todo eso es en gran parte producto, como sabemos bien, de ese hijo de la física cuántica del que traté en el capítulo precedente, el transistor, y de los hijos de este, los circuitos integrados, que junto con los láseres y la fibra óptica, [285] forman un conjunto de instrumentos particularmente bien adaptados al mundo de lo digital, frente a las señales analógicas características de las comunicaciones electrónicas anteriores.[286]

En el capítulo tercero, ya mencioné el TRADIC, el primer computador digital (1954). Poco a poco, pero cada vez con más rapidez, utilizando los circuitos integrados (que engloban números muy elevados de transistores), los computadores se hicieron —como predice la «ley de Moore» («cada dos años, aproximadamente, se duplica el número de transistores en un circuito

integrado»)— más potentes, más rápidos, más pequeños y más baratos. Hasta que en la década de 1970 llegaron los computadores personales (personal computers); esto es, los PC. Aunque no era realmente lo que hoy entendemos por un ordenador personal, el paso de las macrocomputadoras a los PC comenzó cuando una empresa poco conocida de Nuevo México sacó a la venta (por 400 dólares) en 1975 el Altair, aparato informático que desencadenó una serie de desarrollos que condujeron a que, en 1977, se pusiese a la venta el Apple II, creado por Steve Jobs y Stephen Wozniak. Un año antes, Bill Gates había fundado Microsoft, empresa que terminaría dominando una gran parte de este mundo a través, sobre todo, de los desarrollos que creó en el ámbito del software, los lenguajes de programación. En la década siguiente, la de 1980, esos computadores personales se extendieron por los países desarrollados, siendo utilizados para todo tipo de servicios, entre ellos los de muchas empresas, que pasaron a depender de ellos. De uno de los modelos producidos, el Commodore 62, que comenzó a venderse en 1982, se habían vendido 17 millones de unidades en 1994.

Da idea de la importancia y difusión de la computadora-ordenador el que la revista Time en su tradicional elección de «personaje del año» la eligiese como el «personaje» de 1982. De hecho, y como obviamente no es un «personaje», por primera vez en la historia de esa elección tradicional de Time, en la cubierta del 3 de enero de 1983, se podía leer: MACHINE OF THE YEAR. The Computer Moves In (Máquina del año. La computadora se instala). Y el editorial que justificaba la elección, se iniciaba con: «¿POR FAVOR, ME PODRÍA DECIR ALGUIEN, pregunta con burlesca irritación el anuncio en rojo brillante, QUÉ PUEDE HACER UNA COMPUTADORA PERSONAL? El anuncio no proporciona meramente una respuesta, sino cientos de ellas. Una computadora personal, dice, puede enviar cartas a la velocidad de la luz, diagnosticar a un caniche enfermo, preparar en minutos una póliza de seguros adaptada al cliente, comprobar recetas de cerveza. Abundan los testimonios. Michael Lamb, de Tucson, diseñó la manera en que un ordenador personal podía controlar la anestesia durante una operación de cirugía; el grupo de rock Earth, Wind and Fire utiliza uno para hacer explotar bombas de humo durante sus conciertos, el reverendo Ron Jaenisch de Sunnyvale, Calif., programó su máquina de manera que pueda recitar toda la ceremonia de una boda».

El mundo digital es el reino de las terminales, de los, ya prácticamente desaparecidos, CD-ROMs (compact disc-read only memory), módems (modulator- demodulator), aparatos que convierten las señales digitales de los

ordenadores en analógicas para poder transmitir la información por la red telefónica, y viceversa) de las memorias que retienen los bytes (un número fijo de bits, actualmente 8 bits, como un octeto), Megabytes (1 megabyte es igual a un millón de bytes) y sucesivas unidades, gigabytes, terabytes, etc., del ASCII (American Standard Code for Information Interchange), de Telnet e Internet, del correo electrónico, los servidores, las redes, de Microsoft, IBM, Apple, de la fibra óptica, que están sustituyendo a los cables de cobre, de las ya superadas por internet «autopistas de la información» (red de sistemas de comunicaciones por los que circulan gran cantidad de datos), y de las realidades virtuales (aplicaciones producidas para medios electrónicos con las que proporcionar experiencias visuales, dotadas de animación, que una persona puede recorrer y explorar, construyendo un mundo propio y exclusivo, al que efectos ópticos y fisiológicos dan la apariencia de tridimensional; un mundo donde vivir una nueva vida paralela). Según algunas fuentes, en 1972 había únicamente 150.000 ordenadores en el mundo, con la llegada de los ordenadores personales, en 1993 ya eran 152 millones, en 1998, 337 millones, en 2003, 616 millones. En 2010, el país con mayor número de usuarios de computadores personales era Estados Unidos, con 223 millones, le seguían: Japón (69 millones), China (53), Alemania (45), Reino Unido (36), Francia (35) y Corea del Sur (26).

En la frenética dinámica de innovación tecnológica que está experimentando el mundo de las comunicaciones, se está produciendo un nuevo fenómeno: la sustitución de los PC por tabletas (tabletas-computadores) y por las nuevas generaciones de teléfonos móviles inteligentes, o smartphones, como los iPhones, que poseen conexión a Internet, pantallas táctiles (carecen de teclado físico), o los iPad, un dispositivo tipo tableta desarrollado como el anterior por Apple, a caballo entre un PC y un smartphone. De hecho se espera que hacia 2015 el número de tabletas y teléfonos superen en el uso de Internet a los computadores personales.

Y puesto que he mencionado los teléfonos móviles, diré algo de ellos.

El walkie-talkie constituyó una de las grandes novedades de la Segunda Guerra Mundial. Su éxito y atractivo fueron tales que después de la guerra varias empresas intentaron llevar al público general este tipo de telefonía inalámbrica. En 1946, por ejemplo, ATT estableció un servicio público de radiotelefonía en Saint Louis (Estados Unidos). Utilizaba un único transmisor y ofrecía seis canales de transmisión: alguien llamaba, por radio, al operador, que le conectaba con el número con el que deseaba hablar. Tuvo tanto éxito que pronto quedó

bloqueado. Y no podía expandirse sin congestionar las radiofrecuencias. En 1947, ATT dio con la solución: en lugar de utilizar un único transmisor, crear una red de transmisores de baja potencia, cada uno situado en una región, o «célula» (de ahí el origen del término celular: teléfonos móviles o celulares). Al irse desplazando el usuario del teléfono, sus llamadas pasaban de una célula a otra, permitiendo que más personas tuviesen acceso simultáneamente al conjunto de la red. Las primeras redes de teléfonos celulares aparecieron primero en Chicago, en 1978, donde 10 células comunicaban a 2.000 usuarios, y el año siguiente en Japón, pero la tecnología que utilizaban era muy primitiva, muy cara y no existían estándares comunes, lo que complicaba enormemente su difusión. La situación cambió en 1983, cuando se puso en marcha el primer sistema comercial de telefonía celular, o móvil: comenzó con una llamada desde Chicago a un nieto de Alexander Graham Bell, que se encontraba en Alemania. Pertenecía a lo que se puede denominar segunda generación, que utilizaba ya teléfonos digitales en lugar de analógicos. Los circuitos integrados fueron, por supuesto, una parte indispensable para que se convirtieran en lo que ahora son: un procedimiento universal de comunicación social. En 1990, existían unos 12,4 millones de teléfonos móviles (el 0,25 por ciento de la población mundial de entonces), mientras que en 2002 el número era de 1.174 millones (el 19 por ciento de la población) y en 2010, 4.000 millones (67 por ciento de la población). Vistas estas cifras, muy superiores al número de computadoras-ordenadores existentes, no hay duda de que la telefonía es algo particularmente querido y, claro, útil a las personas. No es extraño, asimismo, el volumen de negocio que implica.

La historia nos muestra a veces que algunas personas imaginaron correctamente el futuro. Una de esas personas, una que pensó que llegaría algo parecido a nuestros teléfonos móviles, fue un inglés, William Edward Ayrton (1847-1908), catedrático de Física aplicada e Ingeniería eléctrica desde 1884 hasta su muerte, quien en una conferencia que pronunció en el British Imperial Institute en 1897, manifestó (Ayrton 1884: 548):

No hay duda de que llegará el día en el que probablemente tanto yo como Vds. habremos sido olvidados, en el que los cables de cobre, el hierro y la gutapercha que los recubre serán relegados al museo de antigüedades. Entonces cuando una persona quiera telegrafiar a un amigo, incluso sin saber dónde pueda estar, llamará con una voz electromagnética que será escuchada por aquel que tenga el

oído electromagnético, pero que permanecerá silenciosa para todos los demás. Dirá «¿dónde estás?» y la respuesta llegará audible a la persona con el oído electromagnético: «Estoy en el fondo de una mina de carbón, o cruzando los Andes, o en el medio del Pacífico».

Aun así, a pesar de su clarividencia, es más que probable que Ayrton se hubiese sorprendido ante el número de «oídos electromagnéticos» que poco más de un siglo después de su conferencia existen en el mundo.[287]

INTERNET Y LA «WORLD WIDE WEB»

He mencionado a Internet, el conjunto de redes de comunicación mundial interconectadas que penetra desde hace tiempo en prácticamente todos los rincones del mundo, ciertamente en el desarrollado. Los orígenes de Internet tuvieron que ver —una, si no constante sí frecuente, circunstancia a lo largo de la segunda mitad del siglo XX— con las fuerzas armadas estadounidenses. Las tensiones de la Guerra Fría y la carrera armamentística que las acompañó, hicieron que los militares se preocupasen por la integridad de sus servicios (a la cabeza de ellos el de mando) y operaciones. En la década de 1960, esa preocupación condujo a los estrategas del Departamento de Defensa estadounidense a buscar métodos de conectar sistemas de forma redundante, de manera que si un canal fallase el resto continuase funcionando, un empeño en el que las computadoras-ordenadores, que por entonces ya comenzaban a proliferar, terminarían por desempeñar un papel central. Una serie de innovaciones, a la cabeza de las cuales se sitúa la «conmutación de paquetes» («packet switching»), cuyo fundamento matemático se debe a Leonard Kleinrock (que lo introdujo en 1961, mientras realizaba su tesis doctoral en el MIT) permitió la creación de una red fiable de comunicación entre las computadoras dependientes del Pentágono.[288] La primera de tales redes fue ARPANET (el acrónimo de Advanced Research Projects Agency —«Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada», ARPA— más net, «red»), que comenzó a operar en 1969 conectando los cuatro centros de computación militares más grandes de los Estados Unidos; en 1971 la red de comunicación estaba formada por 15 nodos de conmutación repartidos por todo el país, mediante la cual era posible enviar grandes conjuntos de datos o programas de nodo a nodo. Prácticamente al mismo tiempo, comenzaron a prepararse redes locales (denominadas LANs, de «Local Area Networks») en grandes corporaciones o campus universitarios, redes como la que se estableció en 1973 en el Centro de Investigación de Xerox, en Palo Alto, a la que se llamó Ethernet, que permitía conectar entre sí los ordenadores pequeños de una oficina o edificio, que así compartían bancos de datos. Aquel mismo año, por cierto, Ray Tomlinson, un ingeniero de la empresa Bolt Beranek and Newman, de Cambridge (Massachusetts), se le ocurrió la idea de separar el nombre del receptor de un mensaje y el de su ordenador con el símbolo @, una idea de la que más tarde nacería el correo electrónico personalizado.

Como puede intuirse de todo esto, el panorama de ese tipo de redes de comunicación carecía de una estructura común, incluyendo «protocolos de comunicación» compartidos; se trataba, por así decir, de una serie de «reinos de Taifas» (a los que se habían sumado otras agencias federales), en la que se esbozaban servicios que no habían sido imaginados por los pioneros, como boletines de noticias o mensajes. ARPANET estaba controlada por los militares y no era accesible a usos civiles, pero la presión de extender este nuevo mecanismo de comunicación al conjunto de la sociedad fue cada vez más grande y así, bajo el estímulo y financiación de la National Science Foundation (NSF), recordemos, una agencia civil dependiente del Gobierno Federal, se amplió la red que terminó denominándose INTERNET. Fue a partir de 1981 cuando la NSF se involucró directamente, financiando el establecimiento de una red, Computer Science Network (CSNET), que ofrecía servicios a todos los investigadores computacionales universitarios. En 1985 se creó una red, NSFNET que conectaba centros que poseían supercomputadoras. El éxito fue tal que en 1986 el servicio —al que se habían unido una gran variedad de centros civiles— estaba congestionado, obligando a disminuir el tráfico de comunicaciones. La NSFNET constituyó un notable logro, al establecer por primera vez una red a gran escala (dentro de Estados Unidos), fomentando de esta forma los trabajos para desarrollar técnicas que permitiesen establecer redes de comunicación seguras, rápidas y fácilmente compartibles.

Y en este punto entra en escena la física y la world wide web la celebérrima www, que hizo de las redes de comunicaciones que se estaban desarrollando, de Internet (que, en sí, no es sino un conjunto de ordenadores conectados entre sí mediante medios físicos que comparten unas normas de conexión), el instrumento-vehículo de comunicación auténticamente global que es hoy.

La www se desarrolló en Europa (donde también se estaban estableciendo, aunque más modestamente, otras redes de intercomunicación), más concretamente en el CERN.

En su discurso sobre el «Estado de la Unión» de 1998, ante el Congreso, el presidente Bill Clinton manifestó (citado en White 1998: 30): «Deberíamos hacer posible que todo el mundo explorase todas las posibilidades del ciberespacio. Piensen en esto: la primera vez que pronuncié ante ustedes un discurso sobre el Estado de la Unión, solamente un puñado de físicos utilizaban la World Wide Web, literalmente un puñado de personas. Ahora, en las escuelas, en las bibliotecas, casas y oficinas, millones y millones de americanos surcan la

Red todos los días». «Un puñado de físicos», decía Clinton. Y era verdad. Un puñado de físicos en un campo, el de la física de altas energías, en el que, como ya vimos en el capítulo tercero, se llevan a cabo experimentos que involucran, con frecuencia, a grupos de cientos de personas, no necesariamente residentes en el mismo lugar, ni siquiera en el mismo país y que, consecuentemente, sienten con especial virulencia cualquier problema que dificulte, o simplemente retrase, la comunicación entre ellos. Precisamente como una solución ante esta dificultad, un graduado en Física de la Universidad de Oxford, Tim Berners-Lee (n. 1955), propuso en 1989 la idea de la www, mientras trabajaba (desde 1984) en el CERN.[289]

Como se ha apuntado, existían serios problemas en Internet, problemas a los que Berners-Lee (2000: 17-18) se refirió en un libro que publicó posteriormente:

Internet estaba en marcha en los setenta, pero transferir información era un jaleo para una persona no experta en ordenadores. Uno ponía en marcha un programa para conectarse con otro ordenador y entonces en la conversión (en un idioma diferente) con el otro ordenador, ponía en marcha un programa diferente para acceder a la información. Incluso cuando los datos se habían transferido de vuelta al propio ordenador, decodificarlos podía resultar imposible.

Entonces se inventó el correo electrónico. El e-mail permitía enviar mensajes de una persona a otra, pero no formaba un espacio en el que la información pudiera existir permanentemente y se pudiera acceder a ella. Los mensajes eran transitorios.

La www fue una respuesta a este problema: «navegando por Internet» dio a la información un lugar en el que permanecer. Un ingrediente crucial fue la invención —en la que Berners-Lee fue ayudado por Robert Cailliau— del http (HyperText Transfer Protocol; Protocolo de Transferencia de Hipertexto), un protocolo de ordenador, una base de comunicación de datos para transferir información por Internet de tal modo que pudiera cumplir las exigencias de un sistema de hipertexto global, y del HTML (HyperText Markup Language), un lenguaje de ordenador para representar el contenido de una página de hipertexto, el lenguaje en el que están escritas la mayoría de páginas web.[290]

La propuesta inicial de la www la presentó Berners-Lee al CERN en marzo de 1988. Es interesante citar unos pasajes de la sección titulada «Pérdida de información en el CERN»:[291]

El CERN es una organización maravillosa. Está formada por varios miles de personas, muchas de ellas creativas, que trabajan todas con un objetivo común. Aunque están nominalmente organizadas en una estructura de gestión jerárquica, esto no limita el modo en que la gente se puede comunicar y compartir información, equipo y software entre los grupos.

La estructura de trabajo que se observa actualmente de la organización es una red multiconectada cuyas interconexiones evolucionan con el tiempo. En este ambiente, cada vez que una nueva persona llega o alguien se hace cargo de una nueva tarea, se les suele decir con quién debe comunicarse. La información acerca de las instalaciones existentes y cómo encontrarlas viaja por los pasillos y a veces por carta, y los detalles acerca de lo que es necesario hacer se difunden de manera similar. Teniendo en cuenta todo esto, el resultado es bastante bueno, a pesar de que a veces haya malentendidos y se tengan que duplicar los esfuerzos.

Sin embargo, el gran tránsito constante de gente es un problema. La información se está perdiendo todo el tiempo, ya que la estancia media de las personas es de dos años. La introducción de nuevas personas exige una buena cantidad de su tiempo y del de los demás antes de que los nuevos tengan una idea de lo que está ocurriendo. Los detalles técnicos de proyectos antiguos a veces se pierden para siempre o se recuperan solo por el trabajo detectivesco que se lleva a cabo tras una emergencia. A menudo la información se ha registrado; lo que ocurre es que es imposible encontrarla.

Si un experimento del CERN fuese un desarrollo estático, toda la información podría escribirse en un gran libro. Pero el CERN está cambiando constantemente a medida que surgen nuevas ideas, a medida que aparece una nueva tecnología y a fin de solucionar nuevos problemas técnicos. Cuando se requiere que haya un cambio, este afecta normalmente solo a una pequeña parte de la organización. Surge una razón local para cambiar una parte del experimento o detector. En este momento, hay que rebuscar para descubrir qué otras partes o personas se verán afectadas. Mantener al día el libro resulta poco práctico, y la estructura del libro

tendría que ser revisada constantemente.

La www pretendía, y lo logró, resolver todos estos problemas. El progreso fue lento al principio, pero la Red creció de forma explosiva aprovechándose de que el CERN comenzó a distribuir la tecnología en 1991 y de que unos cuantos laboratorios alrededor del mundo empezaron a utilizarla. En uno de ellos, el Centro Nacional de Aplicaciones para Supercomputación de la Universidad de Illinois, Mark Andreesen y sus colegas crearon el navegador «Mosaic», que mejoraba los programas iniciales mostrando, no solo textos, sino también gráficos y formas interactivas, y que comenzaron a distribuir en 1993. A partir de entonces la extensión de la www resultó imparable. El propio Berners-Lee se daba cuenta en su propuesta pionera que la solución que proponía no afectaba únicamente al laboratorio de altas energías de Ginebra: «Los problemas de pérdida de información pueden ser especialmente graves para el CERN, pero en este caso (como en algunos otros), el CERN es un modelo en miniatura de cómo será el resto del mundo dentro de unos cuantos años. El CERN se encuentra ahora con problemas a los que el resto del mundo tendrá pronto que enfrentarse».[292]

El hecho de que la www fuese inventada en el CERN ha sido utilizado con cierta frecuencia para defender al centro de Ginebra. El argumento es que la exigencia técnica de los experimentos que se realizan allí son de tal envergadura que producen derivados (spin-off) que enriquecen el mundo tecnológico-industrial, beneficiando así tanto a las economías de los países que participan en los experimentos como a la propia sociedad, que termina disponiendo de productos que se derivan de los correspondientes desarrollos técnicos. Un buen ejemplo en este sentido es lo que manifestó Rolf Heuer (2013), director general del CERN, en un artículo que publicó en el diario El País el 1 de agosto de 2013, poco después de que se anunciase la concesión del Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2013 a Peter Higgs, François Englert (por la predicción del bosón de Higgs) y al CERN:

Estos acontecimientos tan relevantes nos ofrecen una inestimable oportunidad para reflexionar sobre el impacto de la ciencia en el progreso y bienestar de la sociedad europea y del conjunto de la humanidad. En este sentido, importantes

transformaciones de nuestra sociedad, como la mejora de la calidad de vida, la revolución de Internet y de la economía en la nube, el desarrollo de las energías renovables y la innovación en la gestión de los residuos están íntimamente vinculadas a descubrimientos estimulados por la investigación básica.

Así, por ejemplo, la World Wide Web, inventada hace 20 años en el CERN, no solo ha generado un cambio esencial en nuestros hábitos sociales y profesionales, sino que también ha promovido un incremento anual de 1,5 billones de euros en el comercio internacional, lo que multiplica por 150 el presupuesto invertido anualmente en el CERN. Y los más de 10.000 aceleradores que se utilizan en los hospitales de todo el mundo o la terapia de hadrones están suponiendo un avance fundamental en el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades como el cáncer.

Es un hecho bien establecido que la investigación básica rinde en ocasiones magníficos dividendos al desarrollo tecnológico, pero es preciso ser cuidadoso con los ejemplos que se ofrecen y evitar un cierto oportunismo. El caso del CERN y la invención de la www muestra los peligros de ese oportunismo, porque, como hemos visto, en un sentido profundo la www es «descendiente» de varios progenitores; entre sus abuelos, sin los cuales simplemente no habría llegado a existir, figura, es preciso insistir en ello, el Pentágono, los intereses militares estadounidenses. Así, si se aplicase el tipo de argumentación que promueven los, en este caso, físicos de altas energías, habría que concluir que la I+D militar es buena para la salud económica y social de las naciones, algo que, por cierto, no deja de tener argumentos en su favor, al menos para ciertos sectores, como bien saben —lo hemos comprobado en este libro— los propios científicos.

ENERGÍA NUCLEAR (I): POLÍTICA[293]

En el capítulo tercero nos apareció la energía nuclear, la fisión del uranio descubierta por Otto Hahn y Fritz Strassmann en el otoño de 1938, el proyecto Manhattan, las bombas lanzadas sobre Hiroshima y Nagasaki, la bomba de hidrógeno y algunas cuestiones relacionadas con el emergente campo de la física nuclear, incluyendo la influencia política de algunos de sus protagonistas (como Ernest Lawrence, Edward Teller, Isidor Rabi o Hans Bethe). Ahora lo que me interesa señalar es que la disponibilidad de energía nuclear afectó a la historia de la segunda mitad del siglo XX. No es posible comprender esa historia, política y social, sin tener en cuenta el mundo nuclear, un hecho que refuerza la tesis del presente capítulo, la de que «la física cambió el mundo». La proliferación de armamento nuclear, especialmente el que disponían Estados Unidos y la Unión Soviética, y los intentos por poner límites mediante acuerdos internacionales, ha exigido muchos, continuados y con frecuencia contradictorios, esfuerzos a las grandes potencias. En cierto sentido, y a pesar de que tales esfuerzos constituyen únicamente un apartado de las relaciones internacionales, especialmente entre las dos grandes potencias, Estados Unidos y la Unión Soviética, ofrecen una buena idea de lo que fueron esas relaciones y, en consecuencia, la historia política de la segunda mitad del siglo XX. Recordaré algunos de los momentos más notables de esa, pequeña a la vez que grande, historia.

La «fiebre nuclear» posterior a Hiroshima y Nagasaki, y una vez que las bombas atómicas dejasen de ser propiedad exclusiva de Estados Unidos, condujo a un periodo de frecuentes pruebas nucleares, con los peligros que ello significaba. En agosto de 1963, Estados Unidos y la Unión Soviética firmaron un Tratado de Prohibición de Pruebas Nucleares para impedir las pruebas nucleares sobre la tierra (esto es, en la atmósfera), en el espacio y en el mar, aunque permitía las subterráneas, lo que facilitaba mejorar los artefactos nucleares.[294] Se trataba de limitar los efectos de la radiactividad, de la «lluvia radiactiva», un peligro que ya se había hecho patente durante las pruebas nucleares que se realizaron en Nevada en 1953, al sufrir muchos animales de la zona las consecuencias de la radiación (algunos murieron). A pesar de que los veterinarios informaron a la Comisión de Energía Atómica estadounidense, esta rehusó pagar ningún tipo de indemnización. El siguiente incidente conocido fue el producido por la prueba nuclear denominada «Bravo» que los estadounidenses realizaron en el Pacífico

el 28 de febrero de 1954. La contaminación afectó a la tripulación de un barco atunero japonés, el Lucky Dragon, y la noticia se difundió por todo el mundo (uno de los marineros murió más tarde, víctima de la radiación).

No todos los países nucleares siguieron estas normas. Francia, que realizó su primera prueba nuclear el 2 de julio de 1966 en el atolón de Mururoa, en la Polinesia francesa, llevó a cabo 167 pruebas entre 1966 y 1986, 44 de ellas atmosféricas, aunque la última de este tipo se realizó el 5 de junio de 1975.[295]

El Tratado de Limitación de Armas Estratégicas (Strategic Arms Limitation Treaty, SALT) entre Estados Unidos y la Unión Soviética constituyó el primer gran paso en el control de la proliferación de armas nucleares. En realidad hubo dos tratados, de diferentes suertes. El primero, SALT I, válido para un periodo de cinco años, se firmó en 1972 y establecía límites sobre todo para las armas defensivas, no para las de ataque. Las negociaciones para el segundo, SALT II, comenzaron en 1972, solo unos meses después de que se hubiese acordado SALT I. Los asuntos a negociar eran algunos que habían quedado fuera de SALT I (por ejemplo, la equiparación en el número de misiles). En 1976, Leonid Brézhnev, Secretario General del Comité Central del Partido Comunista de la Unión Soviética, y presidente del país desde 1964 hasta su muerte en 1982, y el presidente de Estados Unidos Gerald Ford, firmaron un acuerdo previo, el «Acuerdo de Vladivostok», que debía ser válido hasta 1985, y según el cual se tendría que conseguir la paridad entre ambos países en vehículos para transportar armas nucleares, prohibir la construcción de bases terrestres para el lanzamiento de misiles balísticos intercontinentales y establecer sistemas de verificación del seguimiento del acuerdo. El sucesor de Ford en la presidencia, Jimmy Carter, asumió el acuerdo, pero en el proceso de ratificación en el Senado, ya como SALT II, una coalición de senadores hizo imposible que se lograran los necesarios dos-tercios de votos favorables.

Finalmente, está el Tratado General de Prohibición de Pruebas (Comprehensive Test Ban Treaty), que culminó 40 años de esfuerzos para prohibir las pruebas nucleares. Lo firmaron el 24 de septiembre de 1996, en Nueva York, 146 países: prohíbe cualquier tipo —sin excepción— de prueba de arma, o explosión, nuclear.

Un punto no menor es que según el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNPN), firmado por la Unión Soviética y Estados Unidos en julio de 1968, China, Estados Unidos, Francia, Reino Unido y Rusia son las únicas naciones

denominadas oficialmente «nuclear weapon states» («estados con armas nucleares»), entendiendo por tales aquellos que habían fabricado y hecho estallar un artefacto nuclear antes del 1 de enero de 1967. Semejante estatus ha dado a estos países el papel de defensores de la no proliferación nuclear, algo que, razonablemente, no ha sido siempre bien recibido por los países que no disponen de bombas atómicas, ya que ellos están obligados a obedecer las garantías de seguridad de la Agencia Internacional de Energía Atómica —organización fundada por la ONU el 1 de octubre de 1957—, mientras que al «club de los cinco» no.[296] Después de que el TNPN entrase en vigor en 1970, Corea del Norte, India y Paquistán realizaron pruebas nucleares, recibiendo sanciones políticas y económicas por los nuclear weapons states.

Todavía hoy, entrados ya en el siglo XXI, la «cuestión nuclear» no ha desaparecido, aunque, afortunadamente, parece que su intensidad (no su riesgo) sea menor: ahí están, por ejemplo, los casos de los programas nucleares de Corea del Norte o de Irán, o el de Israel, estado del que no hay duda de que posee armamento atómico, aunque nunca lo haya reconocido. Cuando comenzaba el siglo XXI, el número de cabezas nucleares estimadas que poseen los países que se han declarado nucleares era el siguiente (activas/total):[297]

Estados Unidos: 5.735/9.960

Rusia: 5.830/16.000

Francia: 350

Reino Unido: < 200

China: 130

India: 75-115

Paquistán: 65-90

Corea del Norte: < 10

Mientras que Israel, que nunca ha reconocido posee armamento nuclear, dispone de entre 75 y 200.

ENERGÍA NUCLEAR (II): INDUSTRIA

Cuando Eisenhower llegó a la presidencia de Estados Unidos, se pensaba que con la energía nuclear prácticamente todo sería posible; por ejemplo que se podrían utilizar reactores nucleares para propulsar aviones (se estimó que el blindaje necesario pesaría entre 50 y 100 toneladas), un proyecto denominado «Aircraft Nuclear Propulsion», en el que se gastaron mil millones de dólares.

Si en el transporte aéreo la energía nuclear fracasó, no ocurrió lo mismo en el marítimo (militar). En agosto de 1951, la Marina estadounidense firmó un contrato con la Electric Boat Company para la construcción de un submarino impulsado por un reactor de agua a presión: el Nautilus, que Mamie Eisenhower amadrinó en su botadura el 21 de enero de 1954. Se mantuvo operativo hasta el 6 de julio de 1985.[298]

Por su tamaño, los portaaviones constituían un claro objetivo para ser propulsados con energía nuclear. El primer portaaviones nuclear fue el USS Enterprise (CVN-65); su construcción comenzó en febrero de 1958 y fue botado en septiembre de 1960. Lo propulsaban 8 reactores nucleares y 4 turbinas de vapor, ambos tipos fabricados por Westinghouse. En el ámbito civil, el primer buque propulsado por energía nuclear fue uno soviético: el rompehielos Lenin, botado en 1960; en 1962 entró en funcionamiento el mercante estadounidense Savannah, en 1969 el alemán Otto Hahn, en 1972, el japonés Mutsu, y en 1975 y 1977 otros dos rompehielos soviéticos, el Arctic y el Siberia.

El reactor del Nautilus consistía, esencialmente, de placas de uranio-235, moderado y enfriado por agua ordinaria. No era la única elección posible ni, desde el punto de vista de la industria civil, seguramente la mejor, toda vez que convierten únicamente alrededor del 3 por ciento de su combustible en energía utilizable.

Ahora bien, en este punto hay que darse cuenta de que los científicos e ingenieros, la mayoría formados durante el Proyecto Manhattan, que, a partir de los años cincuenta, se dedicaban a la tarea de diseñar reactores nucleares se encontraban con un número enorme de posibilidades, ya que existen muchas variantes para cada componente de un reactor (combustible, refrigerante, moderador). El material fisionable puede ser, por ejemplo, no solo uranio-235,

sino también uranio-233 o, por supuesto, plutonio-239; el refrigerante, agua ordinaria, agua pesada, gas, o metal líquido; el moderador, grafito, berilio, agua ordinaria, agua pesada o, como en el reactor rápido de neutrones, ningún moderador. Se ha llegado a afirmar que si se cuentan todas las combinaciones posibles de combustible, refrigerante y moderador, se pueden identificar alrededor de mil reactores diferentes. Las elecciones que se tomaban inicialmente pesaban gravemente en los caminos a seguir en el futuro. «Cuando miro hacia atrás», escribió en sus memorias Alvin Weinberg (1994: 227-228), director del Oak Ridge National Laboratory entre 1955 y 1973, y una de las figuras más prominentes en el campo de la tecnología de reactores, «me doy cuenta de que la actual preponderancia de reactores de agua a presión surge no de ninguna característica superior del agua, sino de la decisión [...] de propulsar el Nautilus [...] con una versión presurizada del reactor construido en Oak Ridge para hacer pruebas sobre diferentes materiales. Una vez el agua a presión tomó esta ventaja inicial, otras posibilidades fueron descartadas ya que ponerlas a prueba era demasiado caro». Nos encontramos aquí con el eterno problema de las condiciones iniciales y de las vías que en sus innovadores movimientos de apertura también —dramática paradoja— cierra.

En el reactor del Nautilus, del que, de hecho, surgió la energía nuclear comercial, lo que se ha denominado «seguridad intrínseca» (diseñar mecanismos que hagan que el reactor no pueda llegar a estar fuera de control) no era muy importante; al fin y al cabo se trataba de un barco de guerra, en donde convivir con el riesgo es una realidad asumida. Este relativo menosprecio en lo referente a introducir medidas que proporcionasen una seguridad completa del reactor también afectó inicialmente a la tecnología civil de reactores. Es cierto que se alzaron algunas voces en defensa de medidas que favoreciesen una seguridad absoluta. Edward Teller defendió desde el principio el que se colocasen los reactores bajo tierra, y Sam Untermyer diseñó un reactor de agua en ebullición intrínsecamente seguro. Pero estas ideas no fueron tomadas en serio. Recurriendo de nuevo a Weinberg, tales ideas «no podían, sencillamente, haber sido consideradas seriamente. Nadie sabía si los reactores de agua ligera ordinaria podrían alguna vez producir potencia que fuese competitiva con la potencia obtenida a partir de combustibles fósiles». Tampoco se tomó en serio la cuestión de la eliminación de los desechos. «No podíamos», añade Weinberg, en una tan sincera como, sin duda, dolorosa —y para muchos sorprendente— declaración, «imaginar que el público se vería afectado por una radiación-fobia [...] Y como los desechos, una vez solidificados, no podían imponer una carga radiactiva ni siquiera del orden de la natural, nos cogió de sorpresa la violencia de la reacción pública».

La sorpresa de Alvin Weinberg no era sino una consecuencia del optimismo desbordante que surgió en torno al mundo de la ciencia y la tecnología nucleares. La energía nuclear, se pensaba, haría posible el advenimiento de un mundo auténticamente feliz; energéticamente hablando, por supuesto. Son muchos los ejemplos que se pueden ofrecer de entusiasmos por el mundo nuclear. Como el de Lewis Strauss, que en 1954 (ya dirigía entonces la AEC, nombrado por Eisenhower) dibujaba un horizonte, que a lo más tardaría unos quince años, en el que «no será excesivo esperar que nuestros hijos disfruten en sus casas de energía eléctrica demasiado barata como para ser medida en el contador; en el que sabrán de hambrunas regionales endémicas en el mundo únicamente a través de los libros de historia; en el que viajarán sin esfuerzo por los mares o bajo ellos y por el aire con un mínimo de peligros y a grandes velocidades; y en el que gozarán de una expectativa de vida mucho más larga que nosotros».[299] Y todo esto llegaría gracias a la energía nuclear.

La primera central nuclear fue construida en Shippingport (Pensilvania): el contrato para su construcción lo firmó la Westinghouse Corporation el 9 de octubre de 1953, comenzando los trabajos el 6 de septiembre de 1954. El 18 de diciembre de 1957 produjo electricidad por primera vez, que fue distribuida a Pittsburgh y el área circundante por la Duquesne Light Company. El presupuesto inicial para la construcción fue de 70 millones de dólares, pero el coste final alcanzó los 100 millones. Dejó de funcionar a mediados de la década de 1980.

El mismo año en que entró en funcionamiento la central de Shippingport, y para favorecer el desarrollo de la energía nuclear civil, el Congreso norteamericano pasó una ley en 1957. Un aspecto interesante de ella es que minimizaba las responsabilidades en caso de posibles accidentes. Existían precedentes: los autores del Acta para la Energía Atómica de 1954, que habían copiado gran parte de su texto del Acta de Comunicaciones Federales de 1934, únicamente habían incluido vagas especificaciones acerca de requisitos de seguridad. Imperdonable desliz, fruto sin duda del optimismo y de la ansiedad, ya que no es lo mismo, lo sabemos muy bien —y ellos lo deberían haber sabido también—, una comunicación telefónica o telegráfica, o una emisora de radio, que una central nuclear. Un ejemplo en este sentido se dio el 22 de marzo de 1975, en la central nuclear Brown’s Ferry situada en Alabama, a las orillas del rio Tennessee. Aquel día, se inició un fuego eléctrico que se mantuvo, incontrolable, durante siete horas y media, destruyendo 1.600 cables, incluyendo la mayoría de los de seguridad. Los operarios pudieron hacer que dejase de funcionar uno de los dos reactores entonces en funcionamiento, pero no el otro que a punto estuvo de

provocar un gravísimo accidente. El problema había sido las normas de seguridad establecidas.

Pero ni siquiera teniendo en cuenta que inicialmente los requisitos de seguridad no fueron demasiado exigentes, las empresas se animaron a introducirse en este nuevo universo comercial. Serían General Electric y Westinghouse las que, en fecha tan, en principio, tardía como 1963, se lanzaron con entusiasmo — un entusiasmo que impulsaba la competencia entre ellas, tanto o más que sensatas evaluaciones tecnológicas y económicas — a la tarea de construir centrales nucleares. Aquel año, General Electric firmó un contrato, a precio fijo, con Jersey Central Power and Light para suministrarle una planta de 515 megavatios. Sería la primera de las doce centrales nucleares que General Electric y Westinghouse venderían en los tres años siguientes y por las que en conjunto perderían unos mil millones de dólares.[300]

Aun así, el desarrollo de la energía nuclear ha sido bastante seguro. Y la contribución de las centrales nucleares a la producción de electricidad en absoluto desdeñable, al menos en algunos países. En 1996, en Estados Unidos funcionaban 110 reactores nucleares, que producían el 22 por ciento de la electricidad que consumía la nación.

Francia, otro de los cinco nuclear weapons states, ha apostado siempre fuerte por la producción nuclear de electricidad, especialmente a partir de la «crisis del petróleo» de mediados de la década de 1970. En diciembre de 1996, disponía de 57 reactores nucleares (más tres en construcción), que suministraban el 77 por ciento de la electricidad del país. Por el contrario, China, que inició sus programas nucleares a mediados de la década de 1950, y que hizo estallar su primera bomba atómica el 15 de octubre de 1964, no prestó atención a la utilización de la energía nuclear para usos pacíficos hasta la década de 1970: en 1996 solo tenía tres centrales nucleares en funcionamiento y dos en construcción, suministrando menos del 1 por ciento de la electricidad que consume.

Japón, un país con severas limitaciones en fuentes energéticas naturales, encontró en la energía nuclear —cuyos usos militares detesta, por razones evidentes— un excelente instrumento para remediar sus carencias y necesidades energéticas. En diciembre de 1996 disponía de 53 reactores nucleares que suministraban el 33 por ciento de la electricidad.

Y al hablar de Japón, por su cercanía —la catástrofe de Fukushima— vienen inmediatamente a la mente los riesgos de la energía nuclear para usos civiles.

Como es bien sabido, los principales accidentes han sido tres. El primero tuvo lugar en 1979, cuando, debido a un bloqueo en una cañería de agua que refrigeraba uno de los reactores de la central nuclear comercial situada en la isla de las Tres Millas, en Pensilvania, y a que unas válvulas que debían permitir que se pusiese en acción otro mecanismo de refrigeración no funcionasen, se produjo durante 16 horas una situación de auténtica emergencia, fundiéndose cerca de un tercio del núcleo del reactor número 2. La sólida y hermética estructura contenedora que rodeaba al reactor limitó la extensión de los daños causados, pero aun así se produjeron escapes de agua y gases radiactivos. Unas 140.000 personas fueron evacuadas y se emitió una orden temporal prohibiendo el consumo de la producción agrícola y ganadera de la zona.

El 26 de abril de 1986 fue mucho peor. Aquel día uno de los operarios de la central nuclear de Chernobil, próxima a Kiev (Ucrania), dejó que descendiera demasiado el nivel de reactividad de uno de los reactores. Al intentar subsanar su error, la potencia del reactor aumentó de forma incontrolada, produciendo una gran explosión de vapor, a la que siguió una segunda explosión del grafito que se utilizaba como moderador en el reactor. La emisión de residuos radiactivos fue lo suficientemente intensa como para alcanzar a todos los países situados en el hemisferio norte, aunque fuese en la Unión Soviética en donde la contaminación de algunas zonas llegó a tal grado que hubo que proceder al reasentamiento de más de cien mil personas, haciendo necesario, además, emprender extensos programas de descontaminación. Para empeorar las cosas, el gobierno soviético mantuvo una intolerable política de secretismo, a costa de la salud de miles, acaso millones de personas (se sabe que al menos 600.000 personas quedaron expuestas de manera importante a la radiación). El primer informe público se dio el 28 de abril, y se hizo por la presión de Suecia, que por entonces ya estaba cubierta por una nube radiactiva. El día siguiente, el 29, la inteligencia estadounidense tomó fotografías desde satélites. En ellas se veía que el techo del reactor había volado y que las paredes se habían desmoronado. Sin embargo, el gobierno soviético continuó censurando las noticias.

El tercer accidente grave, ya en el siglo XXI (11 de marzo de 2011), fue el de Fukushima (Japón). Como consecuencia de un terrible terremoto (grado 9,0) y del tsunami que lo acompañó, se produjeron fallos en los sistemas de refrigeración, explosiones en los edificios que albergaban los reactores nucleares

y fusión del núcleo de tres reactores, con la subsiguiente liberación de radiación al exterior. Hubo que evacuar a más de 45.000 personas en un radio de diez kilómetros alrededor de la central, límite que aumentó el 13 de marzo a los veinte kilómetros y luego, el 25 de marzo, a los treinta kilómetros. La radiación fue tan intensa que se llegó a identificar en países como Finlandia y España. [301]

Por peligros como los anteriores, más el siempre presente de los productos radiactivos que generan, las centrales nucleares no han sido bien vistas socialmente desde que cesó el entusiasmo inicial por la energía nuclear, habiéndose detenido muchos programas de construcción.[302] Han sido numerosos los movimientos de grupos sociales, algunos expresados incluso en partidos políticos, que se han opuesto, y oponen, a la utilización de centrales nucleares. Sin embargo, en justicia y sin que ello signifique que el autor de este libro defienda este tipo de energía, es preciso recordar que, en conjunto, las centrales nucleares son mucho más seguras, esto es, han producido muchas menos víctimas (un número incomparablemente menor) que, por ejemplo, los automóviles, productores ubicuos de contaminación y de accidentes mortales, o que el consumo de tabaco. En los últimos años, una nueva razón se ha sumado al saldo positivo de las centrales nucleares: en ellas no se produce dióxido de carbono, uno de los agentes que más contribuye al denominado «efecto invernadero»; y antiguos ecologistas que se oponían firmemente a las centrales nucleares, como James Lovelock (2006: 11), el padre de la hipótesis «Gaia», se manifiestan ahora a favor de ellas:

Yo soy un verde, y me cuento entre sus filas, pero ante todo soy un científico; por eso es por lo que ruego a mis amigos ecologistas que reconsideren su ingenua fe en el desarrollo sostenible y las energías renovables y que abandonen la creencia de que con ellas y con políticas de ahorro de energía basta para solucionar el problema al que nos enfrentamos. Más importante todavía es que abandonen su obstinado rechazo de la energía nuclear. Incluso si tuvieran razón acerca de sus peligros —y no la tienen—, usarla como fuente de energía segura y fiable representaría una amenaza insignificante comparada con las incomparables y letales olas de calor y la subida del nivel del mar que amenaza a todas las ciudades costeras del mundo. El concepto de energías renovables suena bien, pero hasta ahora son poco eficaces y muy caras. Tienen futuro, pero no tenemos tiempo para experimentar con ellas: la civilización se enfrenta a un

peligro inminente y tiene que recurrir a la energía nuclear o resignarse a sufrir el castigo que pronto le infligirá un planeta indignado. La política de ahorro de energía de los verdes es correcta, aunque sospecho que, igual que perder peso, es algo que resulta más fácil de decir que de hacer [...]

No estoy diciendo que la energía de fisión nuclear sea lo ideal a largo plazo para nuestro planeta enfermo, o que vaya a solucionar todos nuestros problemas, pero hoy por hoy es la única medicina eficaz de que disponemos.

Una magnífica manifestación de que los tiempos han cambiado con respecto a nuestra percepción de los peligros de la energía nuclear es el número de enero y febrero de 2007 de la revista Bulletin of the Atomic Scientists. Fundada por un grupo de físicos atómicos en 1947, una característica de esta publicación es un reloj que aparece en su cabecera, que marca los minutos que según sus responsables nos separan de un cataclismo nuclear, que correspondería a la medianoche. Al aparecer, la distancia estimada a las 12 de la noche de ese año era de 7 minutos. Desde entonces, el minutero ha cambiado de posición 17 veces, con un mínimo de 2 minutos en 1953, cuando Estados Unidos y la Unión Soviética realizaron sus primeras pruebas con bombas de hidrógeno, y un máximo de 17 minutos en 1997. En el número de enero-febrero de 2007, el reloj, que marcaba 7 minutos desde 2002, se adelantó dejando la distancia a la medianoche en 5 minutos. La novedad es que se trata de la primera vez que el desplazamiento horario tiene lugar en relación con un suceso no nuclear: «Las armas nucleares», se lee en uno de los titulares, «todavía plantean la amenaza más poderosa a la humanidad, pero el cambio climático y las tecnologías emergentes han acelerado nuestra capacidad de autodestrucción». Visto desde esta perspectiva, la utilización de la energía nuclear de fisión adquiere un carácter nuevo, que afecta incluso a su aspecto más controvertido, y peligroso: la larga vida de los residuos. En efecto, si el cambio climático llegase a producirse, la duración de este sería también muy larga, comparable acaso a la de los residuos en cuestión.

FÍSICA Y FÍSICOS EN LAS CIENCIAS DE LA VIDA

La física, acaso más que cualquier otra ciencia, participa, «ayuda» o «sirve de instrumento» a disciplinas científicas diferentes. Una de ellas, particularmente importante, en tanto que se ocupa de algo que nos es muy querido, de nosotros mismos, es la biología, o, mejor, las ciencias de la vida, para incluir así a la medicina. Y no solo es que sea importante — junto a la matemática y la astronomía, la medicina es, por razones obvias, una de las tres primeras ciencias —, y la más básica de todas, la biología, ha protagonizado la tercera, y última, gran revolución del siglo XX, la «revolución del ADN», una revolución que necesitó de una rama de la física: la difracción de rayos X. Pero antes de tratar del descubrimiento de la estructura de la molécula de la herencia, el ácido desoxirribonucleico, debo introducir otros temas sobre el papel de la física en la medicina y ciencias biomédicas.[303]

EL REINO DE LAS IMÁGENES

En 1895, un físico de la Universidad de Wurzburgo hasta entonces no demasiado distinguido, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), descubría una radiación, a la que llamó rayos X (ignoraba su naturaleza), que poseía la capacidad de atravesar cuerpos sólidos, incluidos los del tipo de los tejidos del cuerpo humano, como hizo patente con dramática realidad la fotografía que tomó de la mano de su esposa, en la que se veían con claridad todos los huesos. Las noticias del descubrimiento de estos rayos de naturaleza desconocida (no sería hasta 1911 cuando se demostró que eran ondas electromagnéticas de longitud de onda comparable a la distancia entre los átomos de los cristales, del orden del ångstrom, o 10-10 metros) circularon con cierta rapidez por toda Europa. Así describía en 1911 el físico de Manchester Arthur Schuster (1911: 74-75) la reacción que se produjo en su entorno:

Se puede imaginar el interés que suscitó en el mundo científico el descubrimiento [de Röntgen] y la sensación que creó en todas partes; pocos fueron los laboratorios en los que no se intentó en seguida repetir el experimento [...] Casi inmediatamente, la posibilidad de aplicaciones prácticas atrajo al público y muy especialmente a la profesión médica. Estaba claro que se tenía un método de gran utilidad para el diagnóstico de fracturas complicadas, o para localizar cuerpos extraños en el cuerpo. Para mí, esto tuvo una consecuencia desafortunada. Mi laboratorio se vio inundado por médicos que traían a sus pacientes, de los que se sospechaba que tenían agujas en distintas partes de su cuerpo, y a lo largo de una semana tuve que emplear la mayor parte de tres mañanas en localizar una aguja en el pie de una bailarina de ballet.

De hecho, tres meses después del descubrimiento de Röntgen, el 7 de febrero de 1896, en Montreal, John Cox realizaba la primera publicación de una aplicación médica: la localización de una bala en la pierna de un paciente, que no había podido ser identificada quirúrgicamente. Y enseguida se introdujo la novedad de suministrar a los pacientes sustancias densas para facilitar el contraste de la imagen obtenida mediante la radiación Röntgen: en 1897, Walter B. Cannon

utilizó materiales pesados (bismuto primero y luego sulfato de bario, menos tóxico) administrados como papillas para el estudio del aparato digestivo. Aquel mismo año, 1897, se fundaba en Londres una Roentgen Society, con una revista, Transactions of the Roentgen Society, que en 1904 adoptó el nombre de The Journal of the Roentgen Society, que, a su vez, en 1928 se integró en una nueva publicación, The British Journal of Radiology, órgano del Instituto Británico de Radiología, organización que muestra que el proceso de institucionalización de estas disciplinas físico-médicas estaba en marcha, institucionalización que, en cierto sentido, culminaría bastantes años después, en 1963, con el establecimiento de la Organización Internacional de Físicos médicos. En definitiva, las radiografías, como terminaron siendo denominadas, pasaron a instalarse firmemente en el cuerpo de técnicas médicas. Fue la primera técnica de imagen en utilizarse en la historia de la medicina.

Casi medio siglo después del descubrimiento de Röntgen, el físico estadounidense experto en rayos X Arthur Holly Compton (1945: 537-538), señalaba su transcendencia en un artículo que publicó en la revista médica Radiology:

Si la ciencia es la gran búsqueda intelectual del mundo moderno, el descubrimiento [de los rayos X] constituye uno de los mayores logros de la época. Existen, no obstante, quienes quieren medir la importancia en dólares, o en la forja del destino nacional, o en términos de la vida humana. Incluso en términos tan prácticos, el descubrimiento de los rayos X debería ser reconocido como un acontecimiento extraordinario en la historia del hombre.

En lo que se refiere a la vida humana, deberíamos recordar que el efecto directo de la utilización de los rayos X y del radio, en diagnóstico y terapia, ha salvado un número de vidas que es comparable con el número de soldados muertos en una guerra mundial.

Ahora bien, cuando Compton escribía estas líneas ya era notorio que existían problemas con la técnica: la baja sensibilidad de las películas fotográficas de que se disponía, en los primeros tiempos de la introducción de los rayos X en medicina, hizo que se llegasen a necesitar hasta más de 10 minutos de

irradiación (es fácil imaginar lo que esto significaba; en la actualidad, con las nuevas películas las exposiciones son de unos pocos milisegundos). Pero con el paso del tiempo se introdujeron mejoras que redujeron el riesgo. Importante en este sentido fue la utilización, en 1955, del intensificador de imágenes, que permitía sustituir la placa fotográfica por un dispositivo electrónico de menor resolución, aunque su rápida respuesta facilitaba la observación de imágenes en movimiento; además, abría la puerta a la radiología digital, en la que la placa fotográfica es sustituida por un detector electrónico conectado a un ordenador.

Una hija, o por lo menos pariente próximo, de esta técnica es la tomografía axial computerizada (TAC), en la que un tubo emisor de rayos X y un detector giran describiendo un círculo alrededor del paciente. Con la información recogida, un ordenador reconstruye los cortes tomográficos de la zona del cuerpo que se desea analizar.[304]

Los creadores de esta técnica —por la que recibieron el Premio Nobel de Medicina en 1979— fueron un físico y un ingeniero electrónico, Allan Cormack y Godfrey Hounsfield. Precisamente en su conferencia Nobel, Cormack explicó cómo llegó a interesarse por el problema del que surgió la tomografía axial computerizada; es interesante citar lo que dijo en aquella ocasión:[305]

En 1955, yo era lecturer de Física en la Universidad de Cape Town (Sudáfrica) cuando el físico del Hospital Groote Schuur dimitió. La ley sudafricana exige que un físico propiamente cualificado supervise la utilización de los isótopos radiactivos, y como yo era el único físico nuclear en Ciudad del Cabo me pidieron que pasase un día y medio a la semana en el hospital, vigilando el empleo de isótopos, algo que hice durante la primera mitad de 1956. Me ubicaron en el Departamento de Radiología bajo la dirección del Dr. J. Muir Grieve y en el curso de mi trabajo observé la planificación de los tratamientos de radioterapia. Una mujer superponía tablas de dosis de isótopos y producía contornos de dosis que el médico examinaba y ajustaba, un proceso que se repetía hasta que se encontraba una distribución de dosis satisfactoria. Las tablas de dosis de isótopos eran para materiales homogéneos y se me ocurrió que, como el cuerpo humano no lo es, los resultados se verían deformados por las inhomogeneidades, un hecho del que, por supuesto, los médicos eran muy conscientes. Pensé que para mejorar la planificación del tratamiento tendría que conocerse la distribución del coeficiente de atenuación de los tejidos del cuerpo

[la cuantía de la disminución de intensidad del haz de radiación que se produce al atravesar el cuerpo] y que esta distribución tendría que encontrarse realizando medidas externas al cuerpo. Pronto se me ocurrió que esta información sería útil para los diagnósticos y que constituiría un tomograma o series de tomogramas, aunque no aprendí la palabra «tomograma» hasta muchos años después.

Cormack también pensó que si se obtenía el suficiente número de proyecciones con ángulos diferentes, podría lograrse la información necesaria para determinar de manera cuantitativa la estructura interna del organismo y más tarde reconstruir las imágenes de forma que tuvieran utilidad diagnóstica. Aquel mismo año se trasladó a la Universidad de Harvard, en donde se ocupó de desarrollar una teoría matemática para la reconstrucción de las imágenes, teoría que sometió a pruebas mediante una simulación en el laboratorio el año siguiente, cuando regresó a Ciudad del Cabo. Prosiguió allí con la elaboración de su modelo matemático y realizando experimentos de prueba (siempre con fuentes radiactivas), publicando finalmente sus resultados en 1963, pero estos no atrajeron la atención necesaria.

Diez años después de que Cormack se introdujese en estos dominios, Godfrey Hounsfield, del Departamento de Sistemas Médicos de los Laboratorios Centrales de Investigación de EMI, en Londres, comenzó investigaciones parecidas, pero utilizando una fuente de rayos X. Y, además, fue más allá que Cormack, construyendo una máquina real. Primero probó con un cerebro humano conservado en el museo de un hospital cercano, y luego, en 1972, con un paciente, una mujer de la que se sospechaba que padecía una lesión cerebral. La imagen obtenida reveló un quiste circular en el cerebro. Nacía así la tomografía axial computerizada, un notable ejemplo de los grandes beneficios que se obtienen cuando se producen alianzas entre física, ingeniería y medicina, por mucho que estas sean tan casuales y temporales como la que se produjo en el caso de Cormack. Ocho años después, el mismo año en que Hounsfield y Cormack recibieron el Premio Nobel de Medicina, el nuevo sistema se aplicaba en alrededor de 1.000 hospitales del mundo.

Las técnicas de diagnóstico por imagen no están basadas únicamente en el uso de las radiaciones. También existe la ecografía, una técnica que se desarrolló a partir del sónar, un aparato militar diseñado para la guerra submarina, y en el que se comenzó a trabajar durante la Primera Guerra Mundial, aunque fue durante la

Segunda cuando se perfeccionó. Utiliza ultrasonidos, ondas menos problemáticas que las radiaciones ionizantes al no afectar a los átomos y moléculas de los tejidos. Estas ondas pueden viajar a través de los tejidos biológicos, reflejándose cada vez que encuentran una nueva superficie, lo que sucede cuando pasan por diferentes tipos de tejidos. Cuando se reciben en el detector, las ondas reflejadas se amplifican para poder ser escuchadas, o bien se convierten en señales que pueden ser procesadas con la ayuda de un ordenador para proporcionar datos específicos sobre la forma y posición de los tejidos. En las primeras máquinas de ultrasonidos el paciente tenía que sumergirse en una bañera, pero en 1957 se diseñó un escáner de contacto muy parecido a los, más o menos definitivos, que entraron en servicio hacia 1980, utilizándose preferentemente en las exploraciones durante el embarazo, aunque también se emplea como técnica exploratoria no invasiva en exámenes de, por ejemplo, mama o de próstata.

Otra técnica de imagen de diagnóstico médico desarrollada en la década de 1970 es la tomografía de emisión de positrones (PET; de Positron Emission Tomography), que utiliza las propiedades de los positrones (la antipartícula del electrón) que son producidos en un ciclotrón: tras recorrer una corta distancia, el positrón choca con un electrón del cuerpo del paciente, momento en que tiene lugar la aniquilación de ambos (como ocurre cuando una partícula y su antipartícula chocan). La energía producida en el proceso de aniquilación se disipa en forma de dos fotones que se mueven en direcciones opuestas y que son detectados mediante un par de sensores, procesándose posteriormente la información recibida, lo que permite detectar cambios en la concentración de los tejidos que contenían los electrones iniciales. La PET ha supuesto una herramienta insustituible para estudiar los mecanismos de las reacciones químicas in vivo y las bases moleculares de la adicción a las drogas y del síndrome de abstinencia, del envejecimiento, de diferentes trastornos neurológicos y enfermedades mentales, ya que al contrario que las imágenes proporcionadas por otras técnicas, las imágenes por PET muestran la bioquímica y la fisiología. En este sentido, un acontecimiento relevante tuvo lugar en 1973, cuando la PET se utilizó para mostrar la actividad metabólica cerebral: nacía así una nueva neurología.

MEDICINA NUCLEAR

La mención de los positrones, y de los aceleradores de partículas donde se producen, nos lleva a otro apartado de la medicina del siglo XX dependiente de la física: el de la medicina nuclear.

Esta disciplina se halla conectada con la radiactividad, el fenómeno físico descubierto en 1896 por un físico francés Antoine Henri Becquerel, mientras manipulaba muestras que contenían uranio. Pronto, en 1898, la física polaca Marie Sklodowska-Curie y su marido, Pierre Curie, encontraron que además del uranio existían otros dos nuevos elementos químicos radiactivos: el polonio y el radio. La intensidad de las radiaciones que emanaban del radio condujo a pensar si tendrían alguna aplicación en medicina; aplicando, por ejemplo, sustancias que contuviesen radio sobre tejidos con tumores malignos o benignos, con el propósito de disminuir su tamaño o de eliminarlos —quemándolos— completamente. Y, efectivamente, enseguida se comprobó que la utilización del radio mejoraba la calidad de vida de muchos pacientes, con lo que se estableció una nueva disciplina médica: la radioterapia. Sin embargo, existían contraindicaciones, debidas a la propia potencia radiactiva del radio, que producía graves quemaduras y efectos secundarios (los Curie lo sufrieron personalmente). Se averiguó que la radiación que penetra en los tejidos de personas sometidas a tratamientos con radiactividad son, sobre todo, los rayos gamma que emiten las sustancias radiactivas; por eso, cuando se descubrieron otros elementos radiactivos que también emiten rayos gamma pero que son menos dañinos para los tejidos humanos que el radio, el empleo de este para el tratamiento de cánceres disminuyó drásticamente, hasta su práctica desaparición.

El que los radioisótopos (variedades de elementos químicos —isótopos— radiactivos) tuviesen aplicaciones médicas, siempre deseadas por la sociedad, es algo de lo que se aprovecharon algunos físicos nucleares, como Ernest Lawrence, el «padre» de los ciclotrones, con quien ya nos encontramos. En su búsqueda de financiación para los cada vez más grandes —y por consiguiente más costosos— ciclotrones que quería construir en Berkeley, Lawrence recurrió a diversas instituciones, entre ellas a la Fundación Rockefeller. Ahora bien, esta estaba interesada principalmente en ayudar a las investigaciones médicas, no viendo con particular interés la física de altas energías, y así rechazó al menos

seis solicitudes de Lawrence. Únicamente fue en abril de 1940 cuando aceptó donar 1,4 millones de dólares para la construcción de un ciclotrón que alcanzase los 100 MeV de energía.

Lo que hizo cambiar de opinión a la Fundación fueron las aplicaciones biomédicas de los ciclotrones; esto es, que fuesen capaces de producir elementos químicos radiactivos útiles en medicina. Y es que Lawrence advirtió pronto que su máquina tenía aplicaciones médicas y que estas podían serle de utilidad (de hecho, intentó patentar algunos radioelementos con aplicaciones médicas, para así obtener con su venta fondos para su laboratorio). En un informe que Lawrence preparó en 1934, señalaba que el sodio-24, que era capaz de producir con cierta facilidad, podía tener importantes aplicaciones comerciales. En efecto, este elemento se incorpora a determinadas moléculas del organismo y recorre el cuerpo humano como el sodio ordinario, pero su vida media, 15 horas, era adecuada para realizar estudios sobre la circulación de la sangre: una vez ingeridas cantidades muy pequeñas del mismo, se comprobaba con un contador Geiger que esta sustancia radiactiva llegaba a, por ejemplo, una mano en pocos minutos. Aunque también fue utilizado para diagnosticar algunos desórdenes vasculares, el sodio-24 no hizo, sin embargo, honor a las esperanzas que Lawrence había depositado en él; otros radioelementos generados en el ciclotrón sí lo harían: el fósforo-32 ha sido utilizado con éxito en, por ejemplo, el tratamiento de la leucemia y en la enfermedad de Hodgkin; el yodo-131 para combatir problemas de tiroides, localización de tumores cerebrales, estudios del riñón, hígado y pulmón, el cobalto-60 en la quimioterapia del cáncer y en estudios de anemia perniciosa, y el tecnecio-99 para explorar el cerebro, tiroides, riñones, hígado y bazo.

También contribuyeron al desarrollo de la medicina nuclear otro tipo de factores. En 1935, John Lawrence, hermano de Ernest, demostró, continuando experimentos que el año anterior había iniciado H. F. Blum, del Departamento de Fisiología de Berkeley, que los haces de neutrones eran considerablemente más letales biológicamente que los rayos X y, como los científicos que utilizaban los ciclotrones de su hermano estaban expuestos continuamente a la emisión de neutrones, se redujo la dosis permitida de exposición a las radiaciones ionizantes y se realizaron estudios sobre las formas de atenuarlas. En consecuencia, el laboratorio de Lawrence comenzó a contratar biólogos y médicos, lo mismo que ya había hecho antes con químicos, que completasen a los físicos, una muestra más de lo necesario y fecundo que es la «alianza» entre estas disciplinas. Y una vez en marcha el Proyecto Manhattan para fabricar bombas atómicas, la

conciencia del peligro de las radiaciones aumentó aún más.

Un nuevo paso en la dirección de acercar la física y química nucleares a la medicina, lo dio Dwight David Eisenhower en la ya citada conferencia que pronunció en la ONU el 8 de diciembre de 1953, en la que presentó el programa «Átomos para la Paz». Entonces no olvidó referirse a la necesidad de movilizar expertos «para aplicar la energía atómica a las necesidades de la agricultura, medicina y otras actividades pacíficas». Así, durante la Primera Conferencia Internacional sobre los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear, celebrada en Ginebra en 1955, los temas biológicos y médicos fueron objeto de diez sesiones. En el ámbito terapéutico se presentaron 27 comunicaciones sobre tratamiento con yodo radiactivo y fósforo-32, mientras que en el del diagnóstico se leyeron 54 comunicaciones, una buena parte de ellas sobre el desarrollo de nuevos aparatos de registro. Entre los participantes se encontraba Hal O. Anger, quien estaba culminando entonces su prototipo de cámara de rayos gamma, que finalizó en 1956. La cámara en cuestión funcionaba como una cámara fotográfica que en vez de detectar luz visible registraba radiación gamma, obteniendo imágenes que reflejaban la distribución del trazador (el isótopo radiactivo que se incorpora inocuamente a las rutas metabólicas del organismo).

Una manifestación posterior de las posibilidades médicas de la física nuclear, es otra técnica de imagen, diferente de las anteriores, que se suma a los TAC y PET; una técnica basada en la resonancia magnética nuclear, un fenómeno identificado en 1946, de manera independiente, por dos grupos dirigidos, respectivamente, por los físicos de la Universidad de Harvard, Felix Bloch (ya nos encontramos con él en el capítulo precedente), y Edward Purcell (por ello recibieron el Premio Nobel de Física en 1952) y llevada a la medicina en la década de 1970. El responsable de este nuevo desarrollo fue un médico estadounidense especializado en cáncer y con experiencia en física: Raymond Damadian. Desde el punto de vista físico, el fenómeno se basa en el hecho de que algunos núcleos atómicos (con momento magnético de espín), como el fósforo y el carbono y, en particular, el hidrógeno, cuyo núcleo está constituido por un único protón, se comportan como minúsculos imanes (nanoimanes) cuando se aplica un campo magnético de suficiente intensidad, tendiendo a alinearse los núcleos en la dirección del campo (en realidad, adquieren un movimiento de precesión con una frecuencia dada, alrededor del campo magnético). Si entonces el escáner aplica una señal de radiofrecuencia, una onda electromagnética, con esa misma frecuencia, el núcleo absorbe la radiación y se perturba su configuración, que recupera posteriormente, reemitiendo la radiación, cuando cesa la señal. Durante

el tiempo que tardan los núcleos en retornar a su configuración, las señales que emiten las detecta un sensor, que las envía a un ordenador, en el que mediante técnicas matemáticas, son convertidas en imágenes que revelan la distribución del hidrógeno en el organismo. Y como el hidrógeno es, al formar parte del agua, el componente más abundante en el cuerpo humano y el agua se distribuye de manera diferente por el cuerpo, la señal emitida, que depende de la combinación química de las moléculas del agua, permite obtener imágenes de cualquier tejido del cuerpo y discriminar entre sanos y patológicos.

La idea de Damadian fue suponer que los átomos de hidrógeno de tejidos cancerosos reaccionaban de forma diferente en la resonancia magnética nuclear que los de los tejidos normales. Comenzó a trabajar en esta idea en 1971, desarrollando un mecanismo para hacerla operativa, y el 17 de marzo de 1972 solicitaba una patente para «Detectar tejidos cancerosos en células corporales». La realización práctica llegó el 3 de julio de 1977, con una máquina bautizada como Indomitable (Indomable), con la que tomó la primera imagen topográfica, de un colega, Lawrence Minkoff. En 1978 Damadian fundó una compañía, FONAR, para comercializar su invento. Sin embargo, la técnica era aún algo primitiva: necesitaba cuatro horas para reconstruir las imágenes línea a línea. Desarrollos posteriores han resuelto este y otros problemas (actualmente las imágenes se realizan en segundos) haciendo de la resonancia magnética nuclear una técnica médica con múltiples aplicaciones ya que, a diferencia de, por ejemplo, las radiografías que muestran sustancias sólidas como huesos, permite producir imágenes, de gran contraste, de los tejidos blandos del cuerpo, permitiendo el seccionado de este en «láminas» y generando imágenes a distintas profundidades. Asimismo, sirve para estudiar la bioquímica del cuerpo humano in vivo.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN EL LABORATORIO CAVENDISH

Otra utilización de los rayos X es en el estudio de la estructura de cristales y moléculas. Como apunté antes, cuando se descubrieron se ignoraba si se trataba de corrientes de partículas (electrones, por ejemplo) o eran un tipo de onda electromagnética. Fue el físico alemán Max von Laue quien diseñó un experimento que podría confirmar si se trataba de la segunda posibilidad: lanzar rayos X sobre materiales cristalinos, con la idea de que si la radiación de Röntgen eran ondas de longitud de onda comparable a la distancia entre los átomos que forman el cristal, entonces se producirían fenómenos de interferencia, que serían observables en las imágenes producidas tras el paso de los rayos por el cristal. En 1912, Walter Friedrich y Paul Knipping llevaron a cabo en Múnich el experimento correspondiente, comprobando que, efectivamente, los rayos X eran ondas. Al mismo tiempo que quedaba aclarada la naturaleza de los rayos X, se hacía evidente que constituían un instrumento magnífico para determinar la estructura de los cristales. Lo que había que hacer era estudiar las imágenes resultantes de la difracción de los rayos X que se producía al atravesar el cristal, tarea esta en la que resultó fundamental el nuevo enfoque y la nueva técnica introducida, en 1913, por William Henry Bragg y su hijo William Lawrence Bragg. Las primeras estructuras cristalinas que se determinaron de esta manera fueron las del tipo diamante, fluorita, pirita y calcita, pero también cabía aplicar esta nueva técnica para estudiar la estructura de moléculas de interés orgánico; para lo que era preciso obtener cristales de las moléculas en cuestión y hacer que las atravesasen rayos X.

Los Bragg no abandonaron la veta que habían hallado. En 1915, William Henry se trasladó a Londres, a ocupar una cátedra en el University College, que compatibilizó a partir de 1923 con la dirección de la Royal Institution. Por su parte, William Lawrence obtuvo una cátedra en Manchester en 1919, que dejó en 1937 para ocupar la dirección del National Physical Laboratory, el laboratorio nacional inglés, situado en Teddington, en el que se llevaban a cabo, sobre todo, investigaciones relacionadas con la metrología. Antes de que se separasen sus caminos científicos, padre e hijo llegaron a un acuerdo mediante el cual W. H. se ocuparía en lo sucesivo de determinar estructuras cristalinas de compuestos orgánicos y W. L. las de los inorgánicos. En el University College de Londres, William Henry comenzó a estudiar el naftaleno y el antraceno, cuyas estructuras

determinó en 1921, ocupándose sus ayudantes, Alexander Müller y George Shearer, de los hidrocarburos. Cuando pasó a la Royal Institution continuó con este tipo de investigaciones, convirtiendo de hecho a la antigua institución de Humphry Davy y Michael Faraday en un activo e importante centro dedicado a la investigación de la estructura de cristales orgánicos.

En lo que a William Lawrence se refiere, en Manchester se ocupó sobre todo de investigar la estructura de minerales, en particular de los feldespatos, promocionando también el estudio de la estructura de los metales y la explicación de sus propiedades, un campo de evidente importancia industrial (de hecho, animó a científicos que trabajaban en industrias del área de Manchester a que utilizasen las facilidades de su laboratorio).

El paso de W. L. Bragg por Teddington fue efímero, ya que tras el fallecimiento, en 1937, de Ernest Rutherford se le designó su sucesor en el Laboratorio Cavendish.

Uno de los investigadores que estaban en el Cavendish cuando llegó Bragg era Max Perutz (1914-2002), un joven químico austriaco que se había trasladado a Cambridge atraído por la fama del físico John Desmond Bernal. El interés de Perutz por Bernal no es sorprendente, ya que este realizó contribuciones notables a la cristalografía, tanto en Londres como en Cambridge. Uno de los problemas por el que se interesó, es el de la estructura de las proteínas. «Lo más sorprendente», escribió Bernal (1960: 164) en uno de los libros de divulgación de los que fue autor y que reforzaron su fama, «ha sido el descubrimiento de que las moléculas de proteína pueden cristalizar, o sea, que varios millones de moléculas de la misma clase se pueden colocar “en fibras e hileras” —para emplear una frase de Newton— de un modo tan regular como los átomos más simples en los cristales inorgánicos. Esto implica que las moléculas de proteínas de una misma clase, son sustancialmente idénticas... La existencia de los cristales de proteínas hizo posible examinar su estructura por medio de los rayos X, empleando el mismo tipo de análisis aplicado previamente a los cristales inorgánicos. Así, se pudieron medir exactamente las dimensiones de las moléculas de proteína, desde aquellas que contienen un millar de átomos hasta las que están formadas por varios millones —compuestas principalmente de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno».

Bernal fue el primero en descubrir, en 1934, que los cristales de proteínas producen patrones de difracción de rayos X detallados, con espacios del orden

de las distancias interatómicas. Más concretamente, lo que hizo fue tomar fotografías de difracción de rayos X de un cristal de la proteína pepsina, de las que una dotada ayudante suya, Dorothy Crowfoot (que había estudiado química y cristalografía en Oxford), realizó el subsiguiente análisis obteniendo información sobre su estructura y peso molecular. Merece la pena recordar el párrafo final de este artículo (Bernal y Crowfoot 1934): «Ahora que se ha conseguido una proteína cristalizada que da fotografías de rayos X, está claro que tenemos los medios para comprobar [nuestras ideas] y, examinando la estructura de todas las proteínas cristalizadas, llegar a conclusiones sobre la estructura de la proteína más detalladas de lo que habían permitido los métodos físicos o químicos disponibles con anterioridad».[306]

Y ahora volvamos a Max Perutz.

Natural de Viena, donde se licenció en Químicas, Perutz se trasladó en 1936 a Cambridge, como estudiante posgraduado, atraído por los trabajos sobre vitaminas y enzimas del bioquímico Frederick Hopkins. Terminó, sin embargo, siendo atraído por Bernal, e instalándose en su laboratorio, que formaba ya parte del Cavendish, y que muy poco después de la llegada de Perutz (en 1937) pasaría a ser dirigido por W. L. Bragg.

En Viena, Perutz había podido conseguir unos cristales de hemoglobina (la proteína que da color rojo a las células de la sangre) de caballo, y pronto se dio cuenta de que tenía, en sus propias palabras, «la estructura cristalina más sencilla de todas las proteínas de peso molecular comparable, con características que hacen saltar de gozo al corazón del cristalógrafo». [307] Sin embargo, una cosa era que fuera más sencilla que otras macromoléculas y otra que fuese asequible el elucidar su estructura; ante la ausencia de un método directo para obtener las posiciones atómicas, parecía imposible intentar abordar una estructura molecular tan compleja como la de la hemoglobina. Era, recurriendo de nuevo a sus palabras, «tan prometedor como un viaje a la Luna». No obstante, y apoyado por Bragg, Perutz emprendió aquel viaje, que terminaría muchos años después, en 1953, dos meses antes de que Bragg abandonara el Cavendish, cuando Perutz obtuvo imágenes que demostraban que, en principio, la estructura de la molécula de hemoglobina podía, efectivamente, ser desentrañada. Se tardaría otros cuatro años en dar con el modelo definitivo, siendo de nuevo Perutz el responsable. [308]

Lo que me importa destacar es que la presencia de Max Perutz en el Cavendish

reforzó la línea de investigación dedicada a la determinación de las estructuras tridimensionales de sustancias bio-orgánicas (en 1947, el Medical Research Council creó una «Unidad para el Estudio de la Estructura de Sistemas Biológicos», que nueve años más tarde pasó a denominarse «de Biología Molecular»). Pero antes de seguir con el Cavendish es necesario, para completar el rompecabezas que hizo posible que fuese en él en donde se descubriese la estructura del ADN, adentrarse en otros escenarios. Los primeros, unos en el que los protagonistas fueron un científico alemán que iba para físico cuántico, Max Delbrück, y el creador de la mecánica cuántica ondulatoria, Erwin Schrödinger.

FÍSICOS EN BIOLOGÍA (1): NIELS BOHR Y MAX DELBRÜCK

Natural de Berlín, tras haber estudiado física, Max Delbrück (1906-1981) planeó hacer un doctorado, recibiendo un tema de Walter Heitler. No sorprendentemente teniendo en cuenta de quien procedía la idea —en el capítulo primero ya vimos que Heitler trabajó en la teoría cuántica del enlace químico—, el tema en cuestión era explicar en términos semicuantitativos por qué el enlace covalente entre dos átomos de litio era mucho más débil que el enlace homólogo formado entre dos átomos de hidrógeno. En 1929, en Gotinga, Delbrück finalizó su tesis, que involucraba cálculos bastante engorrosos.

Tras pasar un año en Bristol, con John Lennard-Jones, Delbrück obtuvo una beca de la Fundación Rockefeller por un año. Decidió pasar la primera mitad en Copenhague, junto a Niels Bohr, y la segunda en Zúrich con Wolfgang Pauli. De esta manera pasó a formar parte del círculo de Bohr y, precisamente, debido a este hecho, recibió una influencia decisiva: durante una conferencia que el físico danés pronunció el 15 de agosto de 1932, en la sesión de apertura del II Congreso Internacional de Fototerapia, celebrado en Copenhague, titulada «Luz y vida» (Bohr 1933). En uno de sus artículos, que escribió muchos años después, Delbrück (1989: 255) se refirió a aquella conferencia en los siguientes términos:

Con respecto a la biología, en su conferencia «Luz y vida» de 1932, Bohr propuso que tal vez no fuera reducible a la física atómica. Sugirió que entre los aspectos físicos y psicológicos de la vida tal vez hubiera una complementariedad, análoga a los aspectos de onda y de partícula del electrón. En ese caso habría una especie de principio de incertidumbre de la biología [...] Desde el punto de vista de la física, en aquella época los misterios de la vida eran, en efecto, impresionantes. Los fisiólogos celulares habían descubierto innumerables modos con los que las células responden inteligentemente a cambios de las condiciones ambientales. Los embriólogos habían demostrado cosas tan asombrosas como la posibilidad de obtener dos animales a partir de dos mitades de un embrión. Estos descubrimientos recordaban vagamente la «entereza» del átomo y la estabilidad de sus estados cuánticos. La estabilidad de los genes y el álgebra de la genética mendeliana sugirieron a Bohr que los

procesos que subyacían a los fenómenos eran parecidos a los de la teoría cuántica.

En efecto, en 1932, Bohr (1933: 458) pensaba que, a pesar de las analogías existentes, «los problemas presentan aspectos esencialmente diferentes en física atómica y en biología. Mientras en el campo de la primera estamos interesados, primordialmente, por el comportamiento de la materia en sus formas más sencillas, es, por el contrario, la complejidad de los sistemas materiales, con los cuales nos enfrentamos en biología, lo que tiene significación fundamental, ya que los organismos más primitivos contienen gran número de átomos». Y añadía:

Es cierto que el extenso campo de validez de la mecánica ordinaria, incluyendo nuestro cálculo de los instrumentos de medida utilizados en física atómica, se basa precisamente en la posibilidad (al describir cuerpos formados por muchos átomos) de prescindir en gran parte de la complementariedad inherente al cuanto de acción. Pero lo característico, sin embargo, de la investigación biológica es que nunca podemos controlar las condiciones externas a las cuales está sujeto cualquier átomo aislado en el mismo grado en que es factible hacerlo en los experimentos fundamentales de física atómica. De hecho, ni siquiera es posible determinar qué átomos particulares pertenecen realmente a un organismo vivo, ya que cualquier función vital va acompañada de un cambio de materia, mediante el cual los átomos son constantemente incorporados o eliminados de la organización que constituye el ser viviente.

Creía que las, todavía por descubrir, leyes de la biología serían «complementarias» a las de la física y la química, de manera análoga a como la «continuidad espacial de la propagación de la luz» según el electromagnetismo es complementaria a la «atomicidad de los efectos de la luz», esto es, a los cuantos de luz. Como vemos, se trataba de una extensión del principio de complementariedad en el que basó muchos de sus argumentos en la física y que intentó trasladar —a menudo con bastante ingenuidad— a otros ámbitos.[309]

Treinta años después, en la que acaso fue la última conferencia que pronunció —

falleció pocos meses más tarde—, en la inauguración el 21 de junio de 1962 del Instituto de Genética de Colonia, que se fundó gracias al empuje de Delbrück, Bohr matizó sus ideas (Bohr 1963: 196-197):

Durante mucho tiempo, el hecho de que las funciones reguladoras en los organismos vivos, puestas de manifiesto por estudios de fisiología celular y embriología, exhiban una finura tan poco familiar a las experiencias físicas y químicas normales, hizo pensar en la existencia de leyes biológicas fundamentales sin contrapartida en las propiedades de la materia inanimada estudiada en condiciones experimentales sencillas y reproducibles. Destacando las dificultades de mantener los organismos vivos bajo las condiciones necesarias para una explicación atómica completa, sugerí, en consecuencia, que la existencia misma de la vida debía aceptarse como un hecho básico en biología, en el mismo sentido que el cuanto de acción ha de considerarse en física atómica como un elemento fundamental irreducible a los conceptos de la física clásica.

Al reconsiderar esta conjetura desde nuestro punto de vista actual, debe tenerse presente que la tarea de la biología no puede ser la de explicar el destino de cada uno de los innumerables átomos incluidos, permanente o transitoriamente, en un organismo vivo. En el estudio de los mecanismos biológicos reguladores, nos encontramos más bien ante la imposibilidad de hacer una distinción neta entre la constitución detallada de estos mecanismos y las funciones que cumplen para mantener la vida del organismo completo. Indudablemente, muchos de los términos usados en fisiología práctica reflejan un procedimiento de investigación con el que, partiendo del reconocimiento del papel funcional que juegan las diversas partes del organismo, se intenta dar una explicación física y química de sus estructuras más finas y de los procesos en que están implicados. Siempre que se habla de la vida, ya sea por razones prácticas o epistemológicas, tales términos teleológicos se utilizarán para complementar la terminología de la biología molecular. Sin embargo, esta circunstancia no implica en sí misma limitación alguna en la aplicación de los principios bien establecidos de la física atómica a la biología.

El cambio de opinión de Bohr era consecuencia de los avances que habían tenido

lugar en esas últimas décadas en la aplicación de ideas y técnicas físicas a la biología, avances entre los que figuraban los realizados por Delbrück, que fue, de hecho, quien invitó a Bohr a dar la conferencia de 1962. El propio Bohr (1963: 197-198) mencionó algunos de esos desarrollos en su conferencia:

La aplicación de los métodos y criterios físicos ha permitido realizar grandes progresos en otros muchos campos de la biología. Los recientes descubrimientos de la estructura fina de los músculos y del transporte de los materiales utilizados en la actividad de los nervios son ejemplos notables. Esos descubrimientos, al mismo tiempo que amplían nuestro conocimiento de la complejidad de los organismos, indican ciertas posibilidades de los mecanismos físicos desconocidas hasta ahora. En genética, los primeros estudios realizados por Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück de las mutaciones Timoféeff-Ressovsky producidas por las radiaciones penetrantes permitieron la primera valoración aproximada de las dimensiones espaciales de los cromosomas que son críticas para la estabilidad de los genes.

Los «grandes progresos» facilitados por «métodos y criterios físicos» a que se refería Bohr, habían tenido, como uno de sus protagonistas, a Delbrück, quien se dedicó, a partir de 1934, a buscar una conexión entre la biología y la física, prestando especial atención a la influencia de las radiaciones en la vida. Una ayuda esencial en semejante dirección surgió de la genética clásica: en 1927, el estadounidense Hermann Joseph Muller (1927), entre 1918 y 1920 colaborador de uno de los padres de la genética moderna, Thomas Hunt Morgan, anunció que había inducido mutaciones en la mosca Drosophila melanogaster utilizando rayos X. Este descubrimiento abría el camino a los físicos para que estudiasen los procesos físico-químicos en la entidad biológica denominada «gen», concepto que el propio Muller promovió con fervor, postulando que era la auténtica base de la vida.

Sin embargo, Muller pensaba que la tarea de desentrañar los misterios del gen superaba las habilidades de los genetistas, y urgió a los físicos que fuesen en su ayuda. En 1932, y motivado en parte por problemas personales (un divorcio y la gran presión de trabajo que tenía que soportar le condujeron a una crisis nerviosa), Muller se trasladó a Berlín, donde colaboró con un emigrado ruso,

Nikolai Timoféeff-Ressovsky, que dirigía el Laboratorio de Genética del Instituto de Investigación del Cerebro de la Asociación Káiser Guillermo. Por entonces, Delbrück se encontraba también en Berlín, en donde había organizado un pequeño grupo de discusión en la casa de su madre. Allí conoció a Timoféeff-Ressovsky. Con él y con Karl Günter Zimmer, desarrolló en 1935 un modelo cuántico de mutación genética, en un artículo titulado «Sobre la naturaleza de la mutación genética y la estructura de los genes» (Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück 1935). Un punto central de este artículo, que estaba compuesto por tres aportaciones separadas de cada coautor, más una conclusión común, era la interpretación física del gen. Delbrück escribió la sección teórica, titulada «Modelo físico de la mutación del gen», que se considera de importancia fundamental en la historia de la biología molecular. Consideraba la estabilidad del gen como producto de una «bien definida asociación de átomos»; fue, de hecho, el primero en desarrollar la idea del gen como algo similar a una macromolécula.

Aunque el artículo de Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück resultó incorrecto, a la postre ejerció una notable influencia, constituyendo una de las primeras aproximaciones a la biología molecular.[310] Y esa influencia se vio reforzada por la labor de divulgación ejercida en favor suyo por un librito del creador de la mecánica cuántica ondulatoria, Erwin Schrödinger.

FÍSICOS EN BIOLOGÍA (2): ERWIN SCHRÖDINGER, TEÓRICO DE LA VIDA

Tras una itinerante carrera académica, ocupando cátedras en Breslau (Wroclaw), Zúrich y Berlín (como sucesor de Planck), y que abandonó en 1934, por antipatía con el régimen nazi, por puestos no permanentes en Oxford y Princeton, en 1936 Schrödinger decidió aceptar una nueva cátedra en la austriaca Graz. Cuando en 1938 Alemania se anexionó Austria (el Anschluss), su pasado antinazi no hacía presagiar nada favorable, de manera que Schrödinger huyó. Después de pasar de nuevo un tiempo en Oxford y luego ir a Gante aceptó un puesto permanente, director de la Escuela de Física Teórica, en el nuevo Institute For Advanced Studies de Dublín, creado en 1940 por el primer ministro irlandés y antiguo profesor de matemáticas, Éamon de Valera, donde pasaría los siguientes 17 años. Una de sus obligaciones en Dublín era dar cada año un ciclo de conferencias. Influido por conversaciones que había mantenido con Delbrück en Berlín, y conociendo el artículo de 1935 de Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück, para el ciclo de 1943 escogió como tema el de la vida.[311]

El resultado de aquellas conferencias fue un librito titulado What is Life? (¿Qué es la vida?), que apareció el año siguiente, 1944. El artículo de Timoféeff-Ressosvsky, Zimmer y Delbrück desempeñaba, en efecto, un papel destacado en él; constituía, de hecho, la fuente principal de la teoría desarrollada en los últimos capítulos del libro, uno de los cuales llevaba por título «Discusión y verificación del método de Delbrück» (era a este a quien Schrödinger adjudicaba el mayor mérito del trabajo).

Que el texto de Schrödinger se basaba en el deseo de utilizar la física cuántica en la biología, en concreto para explicar los genes, es algo que se puede comprobar fácilmente sin más que ojear sus páginas, en las que se pueden encontrar sentencias como la siguiente (Schrödinger 1983: 59): «El holandés Hugo de Vries descubrió hace unos cuarenta años que, incluso en la descendencia de cepas realmente puras, un número muy pequeño de individuos, algo así como dos o tres entre varias docenas de miles, aparece con cambios pequeños, pero que suponen una especie de “salto”. La expresión “salto” no quiere significar que el cambio sea especialmente importante, sino que supone una discontinuidad, en el sentido de que no hay formas intermedias entre la forma

inalterada y los pocos individuos que han cambiado. Tras su observación, de Vries les dio el nombre de mutaciones. El hecho significativo es la discontinuidad. Al físico le recuerda la teoría cuántica, según la cual no hay energías intermedias entre dos niveles energéticos contiguos. Podríamos llamar la teoría de la mutación, de forma figurada, la teoría cuántica de la biología [...] Las mutaciones se deben, de hecho, a saltos cuánticos en las moléculas del gen. Pero la teoría cuántica solo tenía dos años cuando de Vries publicó su teoría de la mutación, en el año 1902. No es, pues, extraño que se necesitase una generación más para descubrir la íntima relación entre ambas».

En concreto, las principales preguntas que se hizo Schrödinger en What is Life? se podrían resumir de la siguiente manera: ¿Cuál es la estructura física de las moléculas que se duplican cuando se dividen los cromosomas? ¿Cómo se debe entender el proceso de la duplicación? ¿Cómo retienen, de generación en generación, estas moléculas su individualidad (problema de la herencia)? ¿Cómo logran controlar el metabolismo de las células? ¿Cómo crean la organización que se ve en la estructura y en las funciones de los organismos superiores? A Schrödinger le preocupaba, en suma, el hecho de que los acontecimientos a nivel atómico son muy inestables y efímeros, mientras que los organismos vivos muestran una gran estabilidad. No contestó las preguntas que se formuló, limitándose a sugerir que, de alguna manera, la información necesaria para retener los caracteres que se transmiten de generación en generación debía estar contenida en los enlaces covalentes de un «cristal aperiódico gigante», que denominó «el código hereditario», pero el simple hecho de formular semejantes cuestiones contribuyó a favorecer el desarrollo de la biología molecular.

What is Life? fue un libro muy influyente. En su «Introducción» a Phage and the Origins of Molecular Biology, un libro preparado para rendir homenaje a Delbrück en su sesenta cumpleaños, el biólogo de fagos Gunther Stent (1996: 3) escribió a este respecto:

Poco antes del final de la Segunda Guerra Mundial el gran físico austriaco Erwin Schrödinger, que entonces vivía como un emigrado anti-nazi en Irlanda, escribió el librito What is Life? que iba a atraer amplia atención en el alba de una nueva época de investigación biológica. El por qué este libro produjo tal impacto es algo que nunca estuvo claro. Después de todo, Schrödinger presentó ideas que, incluso entonces, no eran ni particularmente nuevas ni originales. Además, el

libro no se leía demasiado fácilmente; aunque parecía estar escrito con bastante claridad, esa claridad era engañosa, ya que la mayoría de los lectores debieron de tener de vez en cuando la incómoda impresión de que no habían entendido realmente lo que Schrödinger intentaba conseguir. Para los biólogos profesionales el libro tuvo probablemente poca o ninguna influencia. En la medida en que se molestasen en leer What is Life?, probablemente consideraron el título una colosal muestra de pretenciosidad. Cuando se sintieran más caritativos, deben haber contemplado el libro con divertida tolerancia. Pero su impacto propagandístico en los científicos físicos fue muy grande. El conocimiento de biología de estos estaba limitado generalmente al dominio botánico o zoológico, y tener a uno de los Padres Fundadores de la nueva física planteándose la pregunta de «¿Qué es la vida?» les proporcionaba una confrontación autorizada con un problema fundamental merecedor de su atención. Como muchos de estos científicos físicos estaban sufriendo en el inmediato periodo de posguerra de una enfermedad profesional general, estaban ansiosos de dirigir sus esfuerzos hacia una nueva frontera, que, según Schrödinger, estaba dispuesta para algún avance excitante.

FÍSICOS EN BIOLOGÍA (3): FRANCIS CRICK, DE LA FÍSICA A LA BIOLOGÍA

Uno de los «científicos físicos», esto es, de los físicos que confirman la imagen que ofrecía Stent fue Francis Crick (1916-2004). Leyó el libro de Schrödinger, del que escribió en un libro autobiográfico, aunque «solo más adelante logré ver sus limitaciones —como la mayoría de los físicos, su autor no sabía nada de química—, pero sin duda creaba la sensación de que cosas importantes estaban a la vuelta de la esquina» (Crick 1989: 28).

Francis Crick había estudiado en el University College de Londres, graduándose en física a los veintidós años, con matemáticas como optativa. «La física que recibí», manifestó (Crick 1989: 22-23) en las citadas memorias, «era competente, aunque un poco anticuada. Nos enseñaron la teoría del átomo de Bohr, que por aquel entonces (a mediados de los años treinta) ya estaba desfasada. La mecánica cuántica casi no se mencionaba hasta el último año, en el que se daba un cursillo de seis clases». Una vez graduado, comenzó a trabajar bajo la dirección de Edward Neville de Costa Andrade. «Andrade», continuaba explicando en su libro autobiográfico (Crick 1989: 23-24), «me puso a trabajar en el problema más arduo que pueda imaginarse: la determinación de la viscosidad del agua, bajo presión, entre 1000 C y 1500 C». La tarea principal de Crick consistió en construir un recipiente esférico de cobre, hermético (para contener el agua), con un cuello que permitiera la expansión del agua. «Probablemente, esta experiencia me sirvió durante la guerra, cuando tuve que diseñar armas, pero aparte de ello fue una pérdida completa de tiempo. Lo que sí adquirí, aunque fuera indirectamente, fue la seguridad intelectual del físico, la sensación de que la física como disciplina era muy fructífera, así que, ¿por qué no habrían de serlo las otras ciencias? Creo que esto me fue muy útil cuando finalmente, después de la guerra, me decidí por la biofísica. Fue un sano antídoto contra la actitud perseverante, más bien prudente, que reiteradamente encontré cuando empecé a frecuentar a biólogos.»

Durante la Segunda Guerra Mundial, Crick fue empleado, a principios de 1940, como civil en el Ministerio de Marina. Primero trabajó en el Laboratorio de Investigación de la Marina, próximo al National Physical Laboratory de Teddington, al sur de Londres, después le trasladaron al Departamento de Diseño

de Minas, cerca de Portsmouth. Cuando terminó la guerra le dieron un empleo en el servicio de información científica del Ministerio de Marina, en Londres. «Afortunadamente», recordaba en Qué loco propósito, «una mina destruyó el aparato que tan laboriosamente había fabricado en la universidad, de modo que no me sentí obligado a volver a medir la viscosidad del agua.»

Pero Crick (1989: 25) «no sabía qué hacer», aunque «estaba seguro de que no quería pasarme el resto de mi vida diseñando armas». Un día reparó que estaba comentando con cierto entusiasmo los últimos avances realizados con los antibióticos a algunos amigos que tenía en el Ministerio. Estrechó «con rapidez» su «abanico de intereses a dos áreas fundamentales: la frontera entre lo viviente y lo no viviente, y el funcionamiento del cerebro». Fue por entonces cuando leyó What is Life?

Más o menos al mismo tiempo el fisiólogo Hamilton Hartridge le ofreció un empleo para dedicarse al estudio del ojo humano. Pero le surgió un problema, ya que «la semana anterior había resuelto que mi nuevo campo de investigación sería la biología molecular, y no la neurobiología», así que rechazó la oferta. Con la ayuda de quien ya era un físico notable, aunque lo sería más en el futuro, Harrie Massey, con el que había trabajado durante la guerra, conoció a otro físico, Maurice Wilkins, un neozelandés del King's College de Londres que se había licenciado en física en la Universidad de Cambridge en 1938. «Maurice era, en algunos aspectos, fuera de lo corriente. Habían trabajado [Massey y Wilkins] juntos en Berkeley, en la separación de isótopos para la bomba atómica» (esto es, en el Proyecto Manhattan), pero tras la guerra había vuelto a trabajar con su antiguo jefe, John Randall, en el Departamento de Física del King's College de Londres. Randall había logrado convencer al Medical Research Council (MRC) para que apoyara la incorporación de físicos a la biología. «A Randall», explicaba Crick (1989: 30) en sus memorias, «uno de los inventores del magnetrón (novedad fundamental para las aplicaciones militares del radar), no le fue difícil argumentar que, considerando la influencia decisiva que los físicos habían tenido en los resultados de la guerra, ahora podían dirigir sus esfuerzos hacia algunos de los problemas biológicos fundamentales que estaban en la base de la investigación médica. En resumen, había dinero disponible para "biofísicos", y el MRC había montado una de sus unidades de investigación en el King's College, con Randall al frente como director.»

Claro que «no estaba del todo claro qué era exactamente un biofísico, o cuál podría ser su utilidad. En el King's opinaban que un paso importante sería la

aplicación de las técnicas modernas de la física a los problemas biológicos. Wilkins había estado trabajando en un nuevo microscopio de luz ultravioleta, utilizando espejos en lugar de lentes». Sin embargo, Crick no compartía el entusiasmo de Wilkins por este instrumento. Se planteó entonces en qué trabajar y dónde hacerlo. En primer lugar, pensó en la posibilidad del Birkbeck College de Londres «con el cristalógrafo de rayos X, J. D. Bernal». Pero no encontró demasiadas facilidades: «¿Se da cuenta de que gente de todo el mundo quiere venir a trabajar con el profesor?», le espetó (Crick 1989: 32) la secretaria de Bernal, y además el MRC no estaba dispuesto a financiar su trabajo allí. Finalmente, visitó el Laboratorio Strangeways, dirigido por el pionero en el estudio del desarrollo de huesos y cartílagos Honor Fell y dedicado a cultivos celulares, en el que se quedó con una beca del MRC. Después de un año allí, fue a ver al poderoso secretario del MRC, Sir Edward Mellanby, para informarle de sus progresos (entonces estaba obteniendo resultados sobre las propiedades físicas del citoplasma). La visita se produjo en un momento singularmente propicio (Crick 1989: 33-34): «Sobre la mesa de Mellanby estaban los papeles con la propuesta de establecer una unidad del MRC en el Cavendish, con el objeto de estudiar la estructura de las proteínas utilizando la difracción de rayos X. Estaría dirigido por Max Perutz, bajo la dirección general de Sir Lawrence Bragg. Para mi gran sorpresa (ya que yo era un principiante), me preguntó qué opinaba sobre ello. Contesté que me parecía una idea excelente. También dije que ahora que tenía experiencia en biología, me gustaría trabajar en la estructura de proteínas, puesto que consideraba que mi preparación sería más adecuada para este enfoque. Esta vez no puso ninguna objeción, y así despejó el camino que me reuniría con Max Perutz y John Kendrew en el Cavendish».

Esto ocurría en 1947, cuando Crick contaba treinta y un años. «Allí [en el Cavendish]», explicaba en sus memorias (Crick 1989: 14), «me convertí de nuevo en estudiante graduado, intentando aprender algo sobre la estructura tridimensional de las proteínas mediante el estudio de los patrones de rayos X producidos por las proteínas cristalizadas.»

LA ESTRUCTURA DEL ADN

En el Cavendish, y aunque sabía de su trascendencia, Crick no se dedicó de entrada a tratar de elucidar la estructura de la molécula biológica más importante de todas, la del ADN. Una de las razones se encontraba en que entonces, «en Inglaterra, la investigación molecular sobre el ADN era, como señaló James Watson (n. 1928) en su clásico de 1968, The Double Helix, «para todos los efectos prácticos, la propiedad personal de Maurice Wilkins en el King's College de Londres» (Watson 1970: 24). Una de las herramientas que se utilizaban en el King's para tratar de descubrir esa estructura era la difracción de rayos X, pero no fue Wilkins quien obtuvo las imágenes que Francis Crick y James Watson, el joven graduado norteamericano que ampliaba estudios junto a él en el Cavendish, interpretarían como una doble hélice, sino otro miembro del grupo de John Randall en el King's: Rosalind Franklin (1920-1958).

Rosalind Franklin había estudiado química y física en Cambridge, en donde se graduó en 1941. Tras unos años en los que aplicó sus conocimientos químico-físicos en la industria, en 1947 se trasladó a París, al Laboratoire Central des Services Chimiques de l'État, en donde aprendió las técnicas de difracción de rayos X. En 1951 abandonó París por el grupo de Randall, en el King's College de Londres, grupo financiado por el MRC. Fue allí, interaccionando muy poco con Wilkins, en donde obtuvo (mayo de 1952) las primeras fotografías de alta resolución de difracción de cristales de fibras de ADN, que Wilkins enseñó, sin el permiso de Franklin, a Watson, fotografías que dispararon la imaginación de Watson y Crick (también dispusieron de datos de un informe no confidencial presentado por Randall en una reunión de un comité nombrado por el MRC, al que también asistió Perutz, que fue quien luego informó a Watson y Crick).[312] Pero no es este el lugar de entrar en la siempre espinosa y resbaladiza cuestión de prioridades o espionajes (acaso Franklin no habría sido capaz de imaginar la estructura en doble hélice, si hubiese seguido su camino sin competencia), sino recordar el papel que desempeñó la difracción de rayos X en el descubrimiento de los dos investigadores del Cavendish.[313] De esta manera indirecta, sin duda secundaria o subsidiaria, la física intervino en un descubrimiento que también cambió el mundo. Y no solo intervino, también hizo, aunque, por supuesto, no fuese comparable con la reacción de los biólogos (que por otra parte no fue demasiado rápida), que algunos físicos se interesaran por la novedad. Entre ellos

Wolfgang Pauli, que el 16 de febrero de 1954 escribía a Delbrück (Von Meyenn 1999: 471):

Querido Max,

Fue realmente amable de tu parte enviarme una copia de tu conferencia, que te devuelvo aquí de acuerdo con tu deseo. Por supuesto me interesó mucho. Había oído del artículo de Watson-Crick. La estructura que proponen para el ADN atrae mucho al sentido matemático con su pareja de dos cintas unidimensionales y con su fundamento en los "sagrados Cuatro" de los pitagóricos. También oí que alguien ha comenzado a preocuparse por cómo se desenroscan y separan las cintas antes de que se dupliquen. Me pregunto si la presencia de células vivas es esencial para este proceso, o si también puede tener lugar como un proceso químico ordinario sin contacto con ningún material vivo. Esto último parece, al menos, imaginable. Sin embargo, el resultado de Hershey y Chase de que esta misma sustancia, el ADN, también está presente en los bacteriófagos, era nueva para mí, al igual que el resto de tu conferencia.

La comparación al final de tu conferencia de la biología actual con la física de los 1890 también es muy interesante (particularmente para alguien, como yo, algo escéptico acerca del desarrollo de la física en los próximos años). Nos da esperanza de ver en la biología, en el no distante futuro, también el análogo de los años 1900-1905 en la física, cuando la ruptura entre los fenómenos de la física clásica y la cuántica se hicieron por fin claros.

En 1962 Crick, Watson y Wilkins recibieron el Premio Nobel de Medicina «por sus descubrimientos relativos a la estructura de los ácidos nucleicos y su significado para la trasferencia de información en el material vivo». Rosalind Franklin no tuvo oportunidad de recibir su parte del éxito —acaso habría sustituido a Wilkins—, ya que falleció de cáncer en abril de 1958.

LA FÍSICA, UNA CIENCIA INTERDISCIPLINAR

Hasta ahora, me he centrado en dos mundos, el de las comunicaciones y la información, y el de la biomedicina, para sustanciar el papel que la física ha desempeñado en los cambios radicales que han moldeado el mundo de la segunda mitad del siglo XX y lo que llevamos del XXI. Sin embargo, ese papel no se limita a estos campos. La física es una ciencia profundamente interdisciplinar y como tal ha participado de muchos otros desarrollos, de carácter científico, tecnológico o tecnocientífico. Para completar este capítulo final, ofreceré a continuación algunos ejemplos.

EL OJO QUE NOS ACOMPAÑA: EL GPS

Cada vez está más extendida una tecnología, un «servicio», que se encuentra en, por ejemplo, muchos de nuestros coches y teléfonos móviles (terminará estando en todos): el GPS (Global Positioning System; Sistema de Ubicación Global).

Basado actualmente en una red de 27 satélites (24 operativos y 3 de apoyo) que orbitan en torno a la Tierra, el GPS es un elaborado sistema de emisión y recepción de señales y de triangulación que permite determinar la posición de cualquier objeto situado sobre la superficie terrestre, siempre que esté dotado de los medios técnicos de recepción y emisión de señales necesarios. Es importante mencionar que para que este sistema funcione correctamente, con la precisión necesaria para que no se produzcan desviaciones que deformen su objetivo, es indispensable que los relojes situados en los satélites y en la superficie de la Tierra estén perfectamente sincronizados. Y en este punto aparecen dos teorías que publicó Albert Einstein en, respectivamente, 1905 y 1915: la teoría especial de la relatividad y la teoría general de la relatividad. La primera, recordemos, refina la vieja dinámica de Isaac Newton con el resultado de que las magnitudes de los intervalos de tiempo y de espacio dependen del estado de movimiento de quienes hacen las medidas, mientras que de la teoría general resulta que nuestras medidas temporales se ven afectadas por la magnitud del campo gravitacional. [314] Obviamente, estos efectos toman protagonismo cuando intervienen satélites que llevan consigo relojes atómicos y que se mueven con respecto a la Tierra a gran velocidad y en lugares donde la fuerza gravitacional no es la misma que en la superficie terrestre. Por consiguiente, según la relatividad einsteiniana el tiempo transcurre de manera diferente en el reloj del satélite que en un reloj de la Tierra. Es preciso, por tanto, realizar las correcciones oportunas para la sincronización. Si no hiciésemos todo esto, si no recurriésemos a las dos teorías relativistas, nuestros GPS dejarían de ser útiles pasados unos dos minutos, puesto que nos darían posiciones con errores del orden de 10 kilómetros.

FÍSICA Y GEOLOGÍA: LA TECTÓNICA DE PLACAS

Además de las grandes revoluciones científicas que he tratado en los dos capítulos anteriores, en el siglo XX han tenido lugar otras revoluciones «menores», pero de extrema importancia en sus respectivos dominios. Una de ellas ha sido la de la «tectónica de placas», que ofrece una visión completamente nueva de la estructura y dinámica de las capas superiores de la Tierra.[315]

Aunque en el pasado algunos científicos habían efectuado propuestas parecidas, estaban tan carentes de evidencias fuertes que se puede decir, con justicia, que fue el meteorólogo y geofísico alemán Alfred Wegener (1880-1930) el pionero en este campo, al proponer, primero en 1912 y después en un libro que publicó en 1915, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane (El origen de los continentes y océanos), la idea de que los continentes se encuentran en movimiento; que en el periodo Pérmico, esto es, hace más de 250 millones de años, y durante el Triásico (entre 245 y 208 millones de años), los bloques continentales que conocemos estaban agrupados en un gran supercontinente, Pangea. Más tarde, en el Jurásico (entre 208 y 144 millones de años), apareció la primera fisura entre Europa y África, iniciándose un proceso que ha conducido a la geografía continental actual.

Existían muchos problemas para que esa teoría pudiese afincarse con solidez, siendo uno fundamental el conocer el mecanismo con que se desplazan los continentes. «La determinación y la comprobación de las traslaciones continentales relativas», escribía Wegener (2009: 283) en el antepenúltimo capítulo de su libro, «se ha realizado de una forma puramente empírica, a partir de la totalidad de los datos geodésicos, geofísicos, biológicos y paleoclimáticos, pero sin haber hecho ninguna consideración sobre el origen de estos procesos. Este es el método inductivo, método que las ciencias naturales se ven forzadas a emplear en la mayoría de los casos. Las fórmulas de las leyes de la gravedad y de las órbitas planetarias se determinaron en un principio de una forma puramente inductiva, por observación; solo después apareció Newton y mostró cómo derivar estas leyes deductivamente a partir de la fórmula única de la gravitación universal.» Y añadía: «Aún no ha aparecido el Newton de la teoría de los desplazamientos».

El que Wegener se diese cuenta de que todavía no había aparecido el «Newton de la teoría de los desplazamientos», no quiere decir, sin embargo, que se abstuviese de proponer algún mecanismo que explicase, al menos grosso modo, el movimiento continental. Utilizando diversos datos y teorías geofísicas argumentaba que los continentes, que consideraba formados por sial (silicio y aluminio, que corresponden a rocas de granito) «flotaban», cual icebergs, sobre los más densos fondos marinos y continentales (formados por sima, esto es, silicio y magnesio, o rocas de basalto), y que su movimiento se debía a fuerzas de marea producidas por la Luna, junto a una fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra. Pero este mecanismo no convenció a los geólogos contemporáneos de Wegener, ni tampoco a los de las décadas siguientes: habría que esperar hasta después de la Segunda Guerra Mundial y al avance experimentado por la investigación oceanográfica, impulsada por el deseo de las grandes potencias de conocer la geografía y geología de los fondos marinos. No hay que olvidar la importancia política y militar que poseían los submarinos nucleares o convencionales, que hicieron de los océanos un potencial frente de guerra durante la Guerra Fría.

En particular, los estudios realizados sobre fondos marinos durante el Año Geofísico Internacional de 1957 marcaron el punto de partida efectivo de una serie de resultados, basados en la física, entre los cuales hay que mencionar: los estudios de paleomagnetismo (esto es, el magnetismo que queda en las rocas cuando se forman por solidificación a partir del magma) llevados a cabo por los británicos Patrick M. S. Blackett y S. Keit Runcorn; el análisis de los flujos caloríficos en las fallas y dorsales oceánicas a cargo del geofísico británico Edward Bullard;[316] los trabajos relativos a la actividad sismológica de fondos marinos realizados por los estadounidenses Maurice Ewing y Bruce Essen; anomalías gravitacionales detectadas por el geofísico holandés Felix Andries y el norteamericano Harry H. Hess. Fue este último, Hess, quien reunió estos resultados proponiendo, en 1960, la hipótesis conocida subsiguientemente como «expansión de los fondos marinos», que fue confirmada a mediados de aquella década por los geofísicos británicos Frederich Vine y Drummond Matthews (1963). Al analizar los patrones que seguían las anomalías magnéticas a ambos lados de las dorsales oceánicas, relacionaron los patrones magnéticos, simétricos con respecto a una «dorsal» (placa), que se observaban en los fondos marinos, con los cambios del campo geomagnético terrestre, una conclusión a la que también llegó el geofísico canadiense Lawrence Wilson, al que, sin embargo, las revistas Nature y Journal of Geophysical Research rechazaron su artículo (febrero, abril de 1963).[317] Con tales resultados, J. Tuzo Wilson (1965)

introdujo la idea de que la superficie terrestre está formada por varias capas rígidas pero móviles. Se completó así la denominada «Tectónica de Placas», según la cual no son solo los continentes los que se mueven, sino zonas más extensas de la corteza terrestre («placas»), que incluyen partes de los océanos al igual que masas continentales.[318] Las placas (seis grandes y varias más pequeñas) se mueven sobre estratos más profundos, siendo la fuerza motriz corrientes lentas de magma viscoso (el magma es el material fundido que existe en el interior de la Tierra, del que se forman las rocas ígneas; la lava es magma que ha alcanzado la superficie y que se solidifica perdiendo algunos de sus componentes en el camino).

El océano Atlántico puede servir para ilustrar la nueva imagen: el continente americano estuvo unido en el pasado a Euro-África, pero Europa y África comenzaron a separarse durante el Mesozoico (hace 245-265 millones de años). Hasta aquí nada difiere de las ideas de Wegener, pero para este la dorsal atlántica, la cadena montañosa situada en mitad del océano y en cuya parte central existe un profundo valle, o hendidura, no representaba nada especial, simplemente marcaba el lugar de separación de los continentes. Para la tectónica de placas, sin embargo, esa dorsal significa una zona dinámica, la frontera entre dos placas, por donde se crea constantemente nuevo fondo oceánico fruto del flujo de magma que surge de las profundidades de la corteza terrestre. El ritmo al que se crea ese fondo es el mismo con el que aumenta la distancia entre los tres continentes (América, Europa y África). Para Wegener el fondo marino era antiguo, mientras que en la tectónica de placas es joven, especialmente en la zona central, aumentando su antigüedad al alejarse de la dorsal atlántica, esto es, de la frontera que separa a dos placas. Y como la Tierra no aumenta de tamaño, la masa que se va creando y añadiendo a una placa, empuja a esta, un movimiento que además de alejar los continentes entre sí puede conducir a que dos placas choquen. Cuando esto ocurre existen, sobre todo, dos posibilidades: una, que la placa más densa puede verse forzada a sumergirse por debajo de la menos densa, entonces la masa que desciende se funde formando magma, que puede ascender de nuevo a la superficie a través de grietas formando volcanes; pero si las dos placas son comparables, la corteza se arruga de forma gradual, formándose cadenas montañosas, como el Himalaya, los Andes, o las Montañas Rocosas. Existe también otro proceso, en el que, a veces, dos placas se deslizan entre sí; el caso más conocido es el de la falla de San Andrés, en California, donde el movimiento de las placas se asemeja en algunas ocasiones a un «latigazo» repentino, que provoca un terremoto.

LA FÍSICA NO LINEAL

Una de las características de una parte de la física de la segunda mitad del siglo XX, ha sido la de referirse a sistemas no lineales, esto es, aquellos que incluyen potencias superiores o iguales a dos en las variables que deseamos determinar y que dan lugar a que la suma de dos soluciones de las ecuaciones que describen esas leyes no sea otra solución, como ocurre en un sistema lineal.

La riqueza de los sistemas no lineales, su adecuación para el estudio de sistemas, como los vivos, en los que se producen nuevas propiedades, es extraordinaria, y también las novedades que aportan con respecto a los lineales. Desde el punto de vista matemático, los sistemas (ecuaciones) no lineales pueden mostrar transiciones de comportamientos regulares a aparentemente arbitrarios. Pulsos localizados que en sistemas lineales producen perturbaciones que decaen más pronto que tarde, mantienen su individualidad en los sistemas no lineales; esto es, dan lugar a estructuras localizadas y altamente coherentes, con las obvias implicaciones que este fenómeno puede tener en la aparición y mantenimiento de estructuras relacionadas con la vida, desde las células y organismos pluricelulares hasta incluso, aunque pueda parecer una idea peregrina, los pensamientos. La propia evolución de la vida sobre la Tierra ha sido un proceso no lineal, de coevolución, un proceso en el que no es, en absoluto, lo mismo un escenario con un número de especies (una, por ejemplo) que otro con dos o más. La presencia del «otro» afecta al «uno», determinando las características que conducen a sus niveles de supervivencia y reproducción.

La vida es, en efecto, un fenómeno no lineal, que, además, está alejado del equilibrio termodinámico: los seres vivos son sistemas abiertos, en permanente intercambio energético con el medio que les rodea, y en este sentido sistemas alejados del equilibrio. Para los seres vivos, el equilibrio termodinámico equivale a la muerte, por lo que para comprender la vida es imperativo entender la termodinámica de los procesos alejados del equilibrio. Esta es una rama de la física que ha aportado mucho a la comprensión de la vida, que, recordemos, no es solo copia de moléculas, es también transformación de energía. Nadie ha hecho más para que nos demos cuenta de este, por otra parte trivial, hecho que todos aquellos investigadores, físicos y químicos, que a lo largo de la segunda mitad del siglo XX han logrado que la termodinámica se haya desarrollado lo

suficiente como para poder tratar sistemas distintos a los cerrados y en equilibrio. En realidad, en lugar de hablar de intercambios energéticos sería preferible referirse a gradientes, a variaciones de magnitudes, como pueden ser la temperatura o la presión o la concentración química. Los gradientes son la auténtica fuente de la vida, que tiene que luchar contra la tendencia de la naturaleza a reducirlos, es decir, contra la inclinación de la energía a disiparse conforme a la segunda ley de la termodinámica, la del crecimiento de la entropía, de manera que allí donde las circunstancias lo permiten, surgen organizaciones cíclicas para disipar entropía en forma de calor.[319]

De hecho, encontramos este tipo de gradientes energéticos no solo en los procesos asociados a la vida tal y como la entendemos habitualmente, sino también en otros sistemas complejos «no vivos» (en un sentido biológico), que surgen de forma espontánea debido a la existencia de un gradiente. Sistemas como reacciones químicas que se organizan de manera espontánea, o un tipo de células llamadas de Bénard, estructuras hexagonales que solo requieren para aparecer de una variación de temperatura a lo largo de un fluido. O como los tornados, sistemas cíclicos complejos producidos por gradientes de presión barométrica en la atmósfera, cuyo propósito es eliminar el gradiente del que nacen. Y también están los huracanes, enormes sistemas organizados que involucran trillones y trillones de moléculas y que pueden abarcar más de mil kilómetros. Todos estos sistemas «viven» durante un tiempo, es decir, se individualizan y diferencian del caos circundante. La vida tiene un propósito natural similar, solo que, en vez de deshacer rápidamente un gradiente de presión y después desaparecer, tiende a reducir, en el transcurso de miles de millones de años, el enorme gradiente estelar que existe entre el Sol caliente y el espacio frío, ganando complejidad en el proceso.

Otra herramienta preciosa para una mejor comprensión interdisciplinar de la naturaleza procede de otro tipo de sistemas no lineales: los caóticos; esto es aquellos que tienen la propiedad de ser extremadamente sensibles a las condiciones iniciales: si se cambian un poco, minúsculamente, esas condiciones, entonces la solución (la trayectoria que sigue el objeto descrito por la solución) se ve modificada radicalmente, siguiendo un camino completamente diferente, al contrario de lo que sucede en los sistemas no caóticos, aquellos con los que la ciencia —y a su cabeza la física— nos ha familiarizado durante siglos, en los que pequeños cambios en las condiciones iniciales no alteran sustancialmente su evolución posterior.

El tiempo meteorológico constituye uno de los grandes ejemplos de sistemas caóticos; de hecho, fue estudiándolo cuando se descubrió realmente el caos: pequeñas perturbaciones en la atmósfera pueden cambiar el clima en proporciones enormes, como expresa la celebrada frase del «aleteo de la mariposa» del meteorólogo teórico y matemático aplicado Edward Lorenz (1917-2008), al que se considera el padre del caos (Lorenz 1963).[320]

Cada vez está más claro que los fenómenos caóticos abundan en la naturaleza. Los encontramos en dominios propios de la economía, en la biología de poblaciones (en, por ejemplo, algunos modelos «presa-depredador»), termodinámica, química y en el mundo de las ciencias biomédicas (un ejemplo es el de algunas arritmias). «El concepto de caos», ha escrito Joaquín Marro (2008: 85), «es hoy inseparable del desarrollo científico en todos los campos del conocimiento. También es notable que el caos es susceptible de aplicaciones prácticas. Citamos como ejemplo su uso en criptografía para enmascarar mensajes secretos. La estrategia consiste en transmitir el mensaje, quizá cifrado convencionalmente con alguna clave, enmascarado mediante oscilaciones caóticas. Parecerá simple ruido, salvo para el receptor que conozca el mapa que lo ha enmascarado —y los valores usados para los parámetros involucrados— y sepa cómo sincronizarlo con el emisor. El proceso puede hacerse en la práctica con un ordenador o con un circuito electrónico que reproduzca el comportamiento de la ecuación caótica». Y es que a pesar de lo que puede sugerir su nombre (caos), los sistemas caóticos están sujetos a leyes; esto es, existe una «regularidad» que subyace detrás de cada uno de estos sistemas.

La ubicuidad del caos puede llegar incluso al mismo «centro operativo» de la vida humana. «Es posible», leemos en un texto estándar de caos (Smith 2001: 143), «que nuestros cerebros se cuenten entre los sistemas caóticos empíricos presentes en el mundo. El análisis matemático de la propagación de señales en las redes neuronales, junto con algunos trabajos experimentales sugerentes, indica que ciertos estados del cerebro podrían perfectamente evolucionar con una dinámica no lineal, propensa al caos». Si finalmente es realmente así, entonces tal vez podríamos comprender cómo es posible que estados psicológicos aparentemente idénticos (idénticos, claro, a un nivel macroscópico, no en lo que a su estructura fina se refiere) conducen a comportamientos muy diferentes, un hecho este que a veces se explica en base al no comprendido científicamente, pero fundamental para los humanos, «libre albedrío».

LA FÍSICA Y LA EXTINCIÓN DE LOS DINOSAURIOS

Enfrentados con la variedad de formas de vida que existen en nuestro planeta, formas de vida que han ido cambiando (evolucionando) o desapareciendo a lo largo del tiempo, es posible preguntarse cómo la nuestra, la de los homo sapiens, llegó a ser, o, al menos, como superó ese difícil filtro que es la lucha por la existencia, el, como nos enseñó Charles Darwin, gran motor de la evolución de las especies.

De hecho, no ha sido únicamente luchar con otras especies, sino también superar, adecuarse a acontecimientos que han tenido lugar en la historia terrestre. La evolución de la vida en la Tierra ha tenido que convivir con múltiples cambios físicos, periódicos o singulares. Cambios como movimientos de los continentes, o modificaciones en los ciclos orbitales y en la inclinación del eje de precesión de la Tierra que condujeron a las eras de hielo (glaciaciones), ocasionando modificaciones en los niveles de los océanos. Cambios como estos, o de otros tipos, dieron lugar a grandes extinciones, afectando asimismo a algunos caracteres de ciertos organismos.

Las evidencias paleontológicas muestran que en el pasado se han producido al menos cinco grandes extinciones. Vivimos, se podría decir, sobre las cenizas de millones de organismos, de seres vivos, que prosperaron mucho antes de que nuestra especie comenzase su camino, lo que muestra con particular claridad el carácter circunstancial de nuestra existencia y el de todas las formas de vida sobre la Tierra. Una de las extinciones más conocidas fue la que se produjo hace 65 millones de años y que llevó a la extinción en masa de un número enorme de especies. Los rastros fósiles de semejante discontinuidad biológica son tan evidentes que los geólogos la han utilizado desde hace mucho tiempo para definir la frontera entre el Cretácico, el último periodo del Mesozoico, y el Terciario, o primer periodo del Cenozoico. No fue la primera extinción en masa que ha conocido nuestro planeta (la mayor de las cuatro restantes tuvo lugar en el límite inferior del Pérmico, hace 245 millones de años), pero sí la más relevante para nuestra especie, ya que mientras que entre sus víctimas figuraron los dinosaurios, entre los supervivientes de aquel cataclismo se encontraron, junto a reptiles del tipo de los cocodrilos o las tortugas, los, entonces pequeños, mamíferos, que con el paso del tiempo terminarían generando, merced a

procesos evolutivos, especies como la de los humanos. Así, y al igual que somos descendientes del polvo estelar que emanó del Big Bang, primero, y luego, reconvertido, de la explosión de alguna estrella, también somos hijos del apocalipsis que puso término al Mesozoico.

La causa de aquel cataclismo terrestre se averiguó gracias a una colaboración interdisciplinar en la que la física desempeñó un papel importante, junto a la geología y la química. El químico Frank Asaro (1987: 240), uno de los que participaron en aquella investigación, relató las circunstancias que rodearon al proyecto:

A principios de octubre de 1977, Luis W. Alvarez y su hijo Walter aparecieron en mi despacho del Laboratorio Lawence de Berkeley. Luie me presentó a Walt que había llegado hacía poco a Berkeley procedente del Observatorio Geológico Lamont Doherty de Columbia. Los Alvarez habían desarrollado un proyecto que reunía sus disciplinas, la física y la geología, y ahora necesitaban ayuda de algún químico.

Mientras estudiaba la geología de los Apeninos, cerca de Gubbio, Walt había encontrado una interesante capa de arcilla de 1 cm de espesor que marcaba la frontera entre los periodos geológicos Cretácico y Terciario.[321] Esta fina capa, que estaba encerrada entre dos enormes formaciones de caliza, tenía fósiles cretácicos justo debajo y terciarios justo encima. Este cambio formaba parte de una estructura de extinción, de especies y otros taxones, incluyendo los dinosaurios, que se extendía por todo el mundo y que había tenido lugar de manera abrupta al final del Cretáceo [...] Luie y Walt pensaban que si pudieran determinar cuánto tiempo se tardó en que se depositase esta capa y, por tanto, cuánto duró la extinción del Cretácico-Terciario, se arrojaría luz sobre los mecanismos de extinción.

Luis Alvarez pensaba que se podría estimar el tiempo que fue necesario para depositar una capa de arcilla de 1 cm a partir del material extraterrestre que contuviese, ya que continuamente caen sobre la Tierra restos de meteoritos, alrededor de 10 millones de kg cada año. Y había calculado que el iridio sería el mejor elemento para determinar ese material extraterrestre. La corteza de la

Tierra está desprovista de iridio, que fue transportado a su núcleo por el hierro fundido cuando la Tierra era joven. Aunque en los últimos 4.000 millones de años se había acumulado en la corteza terrestre una cantidad considerable de materiales que contenían iridio, su abundancia no supera una milésima del que contienen los meteoritos.

Lo que los Alvarez querían de Asaro es que determinase la abundancia de iridio, utilizando las técnicas de activación de neutrones con las que trabajaba. Ofreció alguna resistencia, pero aceptó finalmente. No fue, sin embargo, hasta el 21 de junio de 1978 cuando Asaro pudo realizar las correspondientes medidas con muestras que le había suministrado Walter Alvarez. Encontraron una abundancia de 3 partes por mil millones (más tarde descubrieron que el valor correcto era de 9 partes), una cantidad más alta de lo que imaginaban: esperaban 0,004. «Algo estaba equivocado en nuestras ideas de cómo el iridio llegó a la arcilla», recordó Asaro (1987: 241). «Pero como el iridio estaba en la capa de la frontera K-T y esta capa se distribuía por todo el mundo, concluimos que el iridio debería estar distribuido por todo el mundo. Como no conocíamos ninguna fuente terrestre que pudiese producir y transportar tanto iridio, la fuente tenía que ser extraterrestre.»

Inmediatamente Luis Alvarez y Asaro se pusieron a buscar posibles explicaciones de la anomalía del iridio, y como Asaro estaba demasiado ocupado con otros trabajos, pidió a Helen Michel, su asociada química nuclear durante 25 años, que se uniese al equipo; de hecho, ya había participado en las medidas de las muestras obtenidas en Gubbio. Se consideraron diversas hipótesis, desde que la Tierra hubiese atravesado nubes gigantes de nebulosas, hasta que el iridio proviniese de la explosión de una supernova, pero todas fueron descartadas.
El 14 de julio de 1979, Luis Alvarez escribió una detallada carta a Walter, Asaro y Michel describiendo «cómo un cometa o un asteroide Apolo [aquellos con una órbita cuyo semieje mayor es mayor que el de la Tierra y cuyo perihelio es menor que el afelio de la Tierra] que llegase a la Tierra, se fragmentaría en la atmósfera y sus pedazos se quemarían produciendo una densa humareda según fuesen cayendo a la Tierra. El humo producido oscurecería el Sol, lo que haría que cesara la fotosíntesis, de manera que los animales morirían de hambre» (Asaro 1987: 242). «Abandonamos esta idea», continuaba recordando Asaro, «porque ese tipo de colisiones se producen muy raramente, los objetos Apolo grandes no se fragmentan fácilmente y las partículas de humo se depositarían rápidamente. Pero Luie se estaba acercando.»

Y así se llegó a la idea final, la de que aquella quinta gran extinción fue debida al impacto de un asteroide de unos diez kilómetros de diámetro, que chocó con la Tierra a una velocidad de aproximadamente treinta kilómetros por segundo, produciendo una energía destructora equivalente a la que librarían cien millones de bombas de hidrógeno. Aquel cataclismo terrestre y cósmico fue lo que dejó una notoria huella paleontológica, la capa K-T, rica en iridio. El 6 de junio de 1980, Science publicaba el correspondiente artículo: «Causa extraterrestre de la extinción del Cretácico-Terciario. Resultados experimentales e interpretación teórica» (Alvarez, Luis, Alvarez, Walter, Asaro y Michel 1980).

Hay episodios de la historia de la ciencia que atraen nuestra atención, más aún, que nos conmueven, porque nos damos cuenta de que tienen que ver con nosotros de una manera profunda, que afectan a la propia esencia de la humanidad. La hipótesis y posterior confirmación del impacto que tuvo lugar hace 65 millones de años es de esta clase, porque nos muestra lo fortuito de nuestra existencia. Y no solo por esto: también porque revela con dramática transparencia el frágil equilibrio sobre el que se basa esa existencia: ¿será nuestra especie víctima en el futuro del impacto de otro gran cuerpo extraterrestre, al igual que sucedió con los dinosaurios?[322]

Pues bien, la física, de la mano de Luis Alvarez, que había obtenido el Premio Nobel de Física en 1968 «por sus decisivas contribuciones a la física de partículas elementales», contribuyó —y de manera muy importante— a ese descubrimiento que tanto tiene que ver con nuestra especie, con todos nosotros.

EPÍLOGO

Podría continuar ofreciendo ejemplos de la presencia de la física en sucesos que contribuyeron de manera destacada a cambiar el mundo de la segunda mitad del siglo XX, ejemplos entre los que no faltaría la economía, con sus jóvenes quants que aplican sus conocimientos físicos y matemáticos a la construcción de modelos económicos, algunos de los cuales no han hecho el mundo mejor, aunque sí a algunos mucho más ricos.[323] Pero ya es, creo, suficiente. La física, insisto, no es la única ciencia, y es obvio que necesita de las demás, con las que en ocasiones se articula y enriquece, pero es innegable que los avances que se han logrado en ella han contribuido más, sostengo, que ninguna otra a cambiar el mundo. A veces para mal, cierto es, pero en general para bien. Y cuando ha sido para mal, no la culpemos a ella, sino a nosotros mismos, sus usuarios. El conocimiento nunca es malo, los malos, los egoístas y estúpidos, con frecuencia somos nosotros.

BIBLIOGRAFÍA

Aczel, Amir D. (2004) Entrelazamiento, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 2002).

Adams, D. J. (1980), Cosmic X-Ray Astronomy, Bristol, Adam Hilger.

Allen, Jack y Misener, Don (1938), «Flow of liquid helium II», Nature 141, 75.

Altschuler, Daniel y Salter, Christopher (2013), «The Arecibo Observatory: fifty astronomical years», Physics Today (noviembre), 43-49.

Alpher, Ralph A. y Herman, Robert C. (1948), «Evolution of the Universe», Nature 162, 774-775.

—, (1990), «Early work on "big bang" cosmology and the cosmic blackbody radiation», en Bertotti, Balbinot, Bergia y Messina, eds. (1990: 129-157).

—, (2001), Genesis of the Big Bang, Nueva York, Oxford University Press.

Alpher, R. A., Herman, R. C. y Gamow, G. (1948), «Thermonuclear reactions in the expanding universe», Physical Review Letters 74, 1198-1199.

Alvarez, Luis W., Alvarez, Walter, Asaro, Frank y Michel, Helen V. (1980), «Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction», Science 208, 1095-1108.

Anderson, Carl (1932), «The apparent existence of easily deflectable positives», Science 76, 238-239.

—, (1933), «The positive electron», Physical Review 42, 491-494.

—, (1999), The Discovery of Anti-matter, Singapur, World Scientific; Richard J. Weiss, ed.

Anderson, M. W., Ensher, J. R., Matthews, M. R. Wieman, C. E. y Cornell, E. A.

(1995), «Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapour», Science 269, 198-201.

Arnison, G. el al. (1983), «Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at √s = 540 GeV», Physics Letters 122 B, 103-116.

Arnold, V., Atiyah, M., Lax, P. y Mazur, B, eds. (2000), Mathematics: Frontiers and Perspectives, American Mathematical Society.

Asaro, Frank (1987), «The Cretaceous-Tertiary Iridium anomaly and the asteroid impact theory», en Trower, ed. (1987: 240-242).

Ashby, Neil (2002), «Relativity and the Global Positioning System», Physics Today 55 (mayo), 41-47.

Ashtekar, A., Cohen, R. S., Howard, D., Renn, J., Sarkar, J. y Shimony, A. eds. (2003), Revisiting the Foundations of Relativistic Physics. Festchrift in Honor of John Stachel, Dordrecht, Kluwer.

Aspect, Alain (1981), «Expériences basées sur les inégalités de Bell,» Supplément au Journal de Physique, Colloque n.º 2, 42, 63-80.

Aspect, Alain, Dalibard, Jean y Roger, Gérard (1982), «Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers», Physical Review Letters 49, 1804-1807.

Aston, Francis W. (1920), «The mass-spectra of chemical elements», Philosophical Magazine 29, 611-626.

Atkins, Stephen E. (2000), Historical Encyclopedia of Atomic Energy, Westport, Conn., Greenwood Press.

Ayrton, William E. (1897), «Sixty years of submarine telegraphy», The Electrician 28, 545-548.

Baade, Walter A. (1952), «Report of the commission on extragalactic nebulae», Transactions of the International Astronomical Union 8, 397-399.

Baade, Walter y Zwicky, Fritz (1934 a), «On super-novae», Proceedings of the

National Academy of Sciences 20, 254-259.

—, (1934 b), «Cosmic rays from supernovae», Proceedings of the National Academy of Sciences 20, 259-283.

Bacciagaluppi, Guido y Valentini, Antony (2009), Quantum Theory at the Crossroads. Reconsidering the 1927 Solvay Conference, Cambridge, Cambridge University Press.

Badash, Lawrence (2009), A Nuclear Winter's Tale. Science and Politics in the 1980s, Cambridge, Mass., The Mit Press.

Bahcall, John N. (1964), «Solar neutrinos. I. Theoretical», Physical Review Letters 12, 300-302.

Bardeen, James M. Carter, Brandon y Hawking, Stephen (1973), «The four laws of black hole mechanics», Communications in Mathematical Physics 21, 161-170.

Bardeen, John y Brattain, Walter (1948), «The transistor: a semiconductor triode», Physical Review 74, 230-231 (L).

—, (1949), «Physical principles involved in transistor action», Physical Review 75, 1208-1225.

Bardeen, John, Cooper, Leon N. y Schrieffer, J. Robert (1957), «Microscopic theory of superconductivity», Physical Review 106, 162-164 (L).

Barret, Jeffrey A. y Byre, Peter, eds. (2012), The Everett Interpretation of Quantum Mechanics, Princeton, Princeton University Press.

Bartholomew, James R. (1989), The Formation of Science in Japan: Building a Research Tradition, Yale University Press, Newhaven.

—, (1997), «Science in twentieth-century Japan», en Krige y Pestre, eds. (1997: 879-896).

Basov, Nicolai G. y Prokhorov, Aleksandr M. (1954), «3-level gas oscillator», Journal of Experimental and Theoretical Physics (Ussr) 27, 431-438.

Becker, Barbara J. (2011), Unravelling Starlight. William and Margaret Huggins and the Rise of the New Astronomy, Cambridge, Cambridge University Press.

Bednorz, J. Georg y Müller, K. Alexander (1986), «Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system», Zeitschrift für Physik B - Condensed Matter 64, 189-193.

Behrends, S. et al. (1983), «Observation of exclusive decay modes of b-flavored mesons», Physical Review Letters 50, 881-884.

Bekenstein, Jacob (1972), Baryon Number, Entropy, and Black Hole Physics, Ph.D. dissertation, Princeton University.

—, (1973), «Black holes and entropy», Physical Review D 7, 2333-2346.

—, (1974), «Generalized second law of thermodynamics in black-hole physics», Physical Review D 9, 3292-3300.

Belfer, Israel (2014), «Information physics: Jacob Bekenstein and the informational turn in theoretical physics», Physics in Perspective 16, 69-97.

Bell, John S. (1964), «On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox», Physics 1, 195-200.

—, (1966), «On the problem of hidden variables in quantum mechanics», Reviews of Modern Physics 28, 447-452.

—, (1981), «Quantum mechanics for cosmologists», en Isham, Penrose y Sciama, eds. (1981: 611-637).

—, (1990), Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica, Madrid, Alianza Editorial (edición original en inglés de 1987).

Bell Burnell, Jocelyn (1977), «Petit Four», Annals of the New York Academy of Sciences 202, 685-689.

Bennet, C. H., Brassard, G., Crépeau, C., Jozsa, R., Peres, A. y Wootters, W. K. (1993), «Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels», Physical Review Letters 70, 1895-1899.

Bennet, C. L. et al. (2013), «Nine-year Wilkinson microwave anisotropy probe (Wmap). Observations: final maps and results», arXiv 1212.5225.

Berger, Ch. et al. (Pluto Collaboration) (1979), «Jet analysis of the Y(9.46) decay into charged hadrons», Physics Letters B 82, 3-4.

Bernal, John D. (1960), La ciencia en nuestro tiempo, México D. F, Universidad Nacional Autónoma de México (edición original en inglés de 1954; segunda edición corregida de 1957).

Bernal, John D. y Crowfoot, Dorothy (1934), «X-ray photographs of crystalline pepsin», Nature 122, 794-795.

Berners-Lee, Tim (2000), Tejiendo la red, Madrid, Siglo XXI, Madrid (edición original en inglés de 1999).

Bernstein, Barton J. (1988), «Four physicists and the bomb: the early years, 1945-1950», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 18, 231-263.

Bernstein, Jeremy (2008), Nuclear Weapons. What You Need to Know, Cambridge, Cambridge University Press.

Bertotti, B., Balbinot, R., Bergia, S. y Messina, A., eds. (1990), Modern Cosmology in Retrospect, Cambridge, Cambridge University Press.

Bessel-Hagen, Erich (1921), «Über die Erhaltungssätze der Elektrodynamik», Mathematischen Annalen 84, 258-276.

Bethe, Hans (1939 a), «Energy production on stars», Physical Review 55, 103.

—, (1939 b), «Energy production in stars», Physical Review 55, 434-456.

—, (1968), «Energy production in stars», Physics Today (septiembre) 36-44.

—, (1991), The Road to Los Alamos, Nueva York, The American Institute of Physics.

Bethe, Hans y Critchfield, C. L. (1938), «The formation of deuterons by proton combination», Physics Review 54, 248-254.

Bethe, Hans y Peierls, Rudolf (1934), «The neutrino», Nature 122, 532-533.

Binning, Gerd, Rohrer, Heinrich, Gerber, Christoph y Weibel, Edmund (1982), «Surface studies by scanning tunneling microscopy», Physical Review Letters 49, 57-61.

Blackett, P. M. S. y Occhialini, G. P. S. (1933), «Some photographs of the tracks of penetrating radiation», Proceedings of the Royal Society (London) A 129, 699-726.

Bloch, Felix (1928), «Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern», Zeitschrift für Physik 52, 555-600.

—, (1980), «Memories of electrons in crystals», Proceedings Royal Society of London A 271, 24-27.

Boag, J. W., Rubinin, P- E. y Shoenberg, D., eds. (1990), Kapitza in Cambridge and Moscow. Life and Letters of a Russian Physicist, Amsterdam, North-Holland.

Bohm, David (1952 a), «A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables, I», Physical Review 85, 166-179.

—, (1952 b), «A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables, II», Physical Review 85, 180-193.

—, (1977), «Science as perception-communication», en Suppe, ed. (1977: 374-391).

Bohm, David y Aharonov, Yakir (1957), «Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky», Physical Review 108, 1070-1076.

Bohr, Niels (1913). «On the constitution of atoms and molecules», Philosophical Magazine 26, 1-25.

—, (1933), «Light and life», Nature 121, 421-423, 457-459.

—, (1935), «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», Physical Review 48, 692-702.

—, (1958), «Quantum physics and philosophy: Causality and complementarity», en Klibansky, ed. (1958: 308-314).

—, (1963), «Light and life revisited», ICSU Review of World Science 5, 194-199.

—, (1970 a), «Física cuántica y filosofía. Causalidad y complementariedad», en Bohr (1970 b: 3-10).

—, (1970 b), Física atómica y conocimiento humano, Madrid, Aguilar.

Bohr, Niels y Rosenfeld, Léon (1933), «Zur frage der messbarkeit der elektromagnetischen feldgrössen», Mathematisk-fysiske Meddelelser Danske Videnskabernes Selskab. 12, n.º 8, 3-65.

—, (1979), «On the question of the measurability of electromagnetic field quantities», en Cohen y Stachel, eds. (1979: 357-400).

Bolton, Thomas (1972), «Identification of Gyg X-1 with HDE 226868», Nature 225, 271-273.

Bondi, Hermann (1952), Cosmology, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1960), Cosmology, segunda edición, Cambridge, Cambridge University Press. Existe traducción al español (no demasiado exacta): Bondi (1970).

—, (1970), Cosmología, Barcelona, Editorial Labor.

Bondi, Hermann y Gold, Thomas (1948), «The steady-state theory of the expanding universe», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 108, 252-270.

Boole, George (1854), An Investigation on the Laws of Thought on Which are Founded the Mathematical Theories of Logic ad Probabilities, Londres, Walton and Maberly.

Born, Max (1926), «Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge. (Vorläufige Mitteiling)», Zeitschrift für Physik 27, 863-867.

—, (1935), «Quantum electrodynamics», en International Conference on Physics

(1935: 19-27).

—, (2005), The Einstein-Born Letters, 1916-1955, Nueva York, Macmillan.

Born, Max y Heisenberg, Werner (2009), «Quantum mechanics» (originalmente publicado en Électrons et Photons 1928), en Bacciagaluppi y Valentini (2009: 372-401).

Born, Max, Heisenberg, Werner y Jordan, Pascual (1926), «Zur Quantenmechanik. II», Zeitschrift für Physik 25, 557-615.

Bose, Satyendranath (1924), «Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese», Zeitschrift für Physik 26, 178-181.

Bouwmeester, D., Pan, J.-W., Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H. y Zeilinger, A. (1997), «Experimental quantum teleportation», Nature 290, 575-579.

—, (1998), «Experimental quantum teleportation», Philosophical Transactions of the Royal Society London A 256, 1733-1737.

Bowen, Edward G. (1984), «The origins of radio astronomy in Australia», en Sullivan III, ed. (1984b: 85-111).

—, (1998), Radar Days, Bristol, Institute of Physics Publishing.

Bowler, Peter J. y Pickstone, John V., eds. (2009), The Cambridge History of Science, vol. 6 (The Modern Biological and Earth Sciences), Cambridge, Cambridge University Press.

Braes, L. L. E. y Miley, G. K. (1971), «Radio emission from Scorpius X-1 at 21,2 cm», Astronomy and Astrophysics 14, 160-163.

Brandt, Siegmund (2009), The Harvest of a Century, Nueva York, Oxford University Press.

Brans, Carl H. y Dicke, Robert H. (1961), «Mach’s principle and a relativistic theory of gravitation», Physical Review 124, 925-935.

Brattain, Walter y Bardeen, John (1948), «Nature of the forward current in germanium point contacts», Physical Review 74, 231-232.

Braun, E. y Macdonald, S. (1982), Revolution in Miniature, Cambridge, Cambridge University.

Breit, Gregory (1947), «Does the electron have an intrinsic magnetic moment?», Physical Review 72, 984.

Brillouin, Léon (1956), Science and Information Theory, Waltham, Academic Press.

Bromberg, Joan (1976), «The concept of particle creation before and after quantum mechanics», Historical Studies in the Physical Sciences 7, 161-191.

—, (1991), The Laser in America, 1950-1970, Cambridge, Mass., The Mit Press.

Brown, Gerald E. y Lee, Chang-Hwan, eds. (2006), Hans Bethe and His Physics, Singapur, World Scientific.

Brown, Laurie M. (1978), «The idea of the neutrino», Physics Today (septiembre); reproducido en Weart y Phillips, eds. (1985: 340-345).

—, (1981), «Yukawa's prediction of the meson», Centaurus 25, 71-132.

—, (2006), «Paul A. M. Dirac's The Principles of Quantum Mechanics», Physics in Perspective 8, 381-407.

Brown, Laurie M., ed. (2005), Feynman's Thesis. A New Approach to Quantum Theory, Singapur, World Scientific.

Brown, Laurie M. y Hoddeson, Lillian, eds. (1983), The Birth of Particle Physics, Cambridge, Cambridge University Press.

Brown, Laurie, Dresden, Max y Hoddeson, Lillian, eds. (1989), Pions to Quarks, Cambridge, Cambridge University Press.

Brown, Laurie M., Pais, Abraham y Pippard, Brian, eds. (1995), Twentieth Century Physics, 3 vols., Bristol/Nueva York, Institute of Physics Publishing/American Institute of Physics Press.

Brown, Laurie M. y Rechenberg, Helmut (1996), The Origin of the Concept of Nuclear Force, Bristol, Institute of Physics Publishing.

Brown, R. Hanbury y Twiss, P. Q. (1954), «A new type of interferometer for use in Radio Astronomy», Philosophical Magazine 45, 663-682.

Brück, H. A., Coyne, G. V. y Longair, M. S., eds. (1982), Astrophysical Cosmology. Proceedings of the Study Week on Cosmology and Fundamental Physics, Ciudad del Vaticano, Pontificia Academia Scientiarum.

Buchwald, D. Kormos, Sauer, T. Rosenkranz, Z. Illy, József y Holmes, V. Iris, eds., (2006), The Collected Papers of Albert Einstein, vol. 10 (The Berlin Years: Correspondence, May-December 1920, and Supplementary Correspondence, 1919-1920, Princeton, Princeton University Press.

Buckingham, A.D. (1987), «Quantum chemistry», en Kilmister, ed. (1987: 112-118).

Burbidge, E. Margaret, Burbidge, Geoffrey R., Fowler, William A. y Hoyle, Fred (1957), «Synthesis of the elements in stars», Reviews of Modern Physics 29, 547-650.

Busch, Hans (1927), «Über die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre», Archiv Elektrotechnik 18, 583-594.

Cabrera, Blas (1982), «First results from a superconductive detector for moving magnetic monopoles», Physical Review Letters 48, 1378-1381.

Campbell, W. W. (1900), «James Edward Keeler», Astrophysical Journal 12, 239-253.

Carnap, Rudolf (1963), «Intellectual autobiography», en Schilpp, ed. (1963: 1-84).

Carr, H. Wildon, Nunn, T. P., Whitehead, A. N. y Wrinch, Dorothy (1922), «Discussion: The idealistic interpretation of Einstein’s theory», Proceedings of the Aristotelian Society 22, 123-138.

Carson, Cathryn y Hollinger, David, eds. (2005), Reappraising Oppenheimer. Centennnial Studies and Reflections, Berkeley, Berkeley Papers in History of Science.

Cartan, Élie (1922), «Sur une géneralisation de la notion de courbure de

Riemann et les espaces à torsion», Comptes rendus de l'Académie des Sciences 174, 593-595.

—, (1923), «Sur les variétés à conexión affine et la théorie de la relativité généralisée», Annales de l'École Normale 40, 325-412.

Cassidy, David C. (1981), «Cosmic ray showers, high energy physics, and quantum field theories: programmatic interactions in the 1930s», Historical Studies in the Physical Sciences 12, 1-39.

Cassirer, Ernst (1910), Substanzbegriff und Funktionsbegriff, Berlín, Bruno Cassirer Verlag.

—, (1921), Zur Einstein'schen Relativitätastheorie, Berlín, Bruno Cassirer Verlag.

—, (1949), «The philosophical significance of the theory of relativity», en Schilpp, ed. (1949: 287-311).

—, (1953), Substance and Function & Einstein's Theory of Relativity, Nueva York, Dover.

Cat, Jordi (1998), «The physicists' debates on unification in physics at the end of the 20th century», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 28, 253-299.

Cayley, Arthur (1858), «A memoir on the theory of matrices», Philosophical Transactions of the Royal Society of London 148, 17-37.

CERN (2008), Infinitamente CERN. Testimonios de cincuenta años de investigación, Ginebra, Ediciones Suzanne Hurter.

Chadwick, James (1932), «The existence of a neutron», Proceedings of the Royal Society (London) A 126, 692-708.

Chamberlain, Owen, Segrè, Emilio, Wiegand, Clyde y Ypsilantis, Thomas (1955), «Observation of antiprotons», Physical Review 100, 947-950.

Chandrasekhar, Subrahamanyan (1931 a), «The highly collapsed configurations of a stellar mass», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 91, 456-

466).

—, (1931 b), «The maximum mass of ideal white dwarfs», Astrophysical Journal 74, 81-82.

—, (1932 a), «Some remarks on the state of matter in the interior of stars», Zeitschrift für Astrophysik 5, 321-327.

—, (1932 b), «The maximum mass of ideal white dwarfs», Astrophysical Journal 74, 81-82.

—, (1935), «Stellar configurations with degenerate cores», The Observatory 58, 37.

—, (1983), Eddington. The Most Distinguished Astrophysicist of his Time, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1988), «Prólogo», en Eddington (1988: vii-xi).

Chandrasekharan, K., ed. (1986), Hermann Weyl, 1885-1985, Berlín, Springer-Verlag.

Chern, S. S. (1957), «Review of Théorie globale des connexions et des groupes d'holonomie», Bulletin of the American Mathematical Society 62, 57-59.

Choquet-Bruhat, Yvonne (1952), «Théorème d'existence pour certains systèmes d'équations aux dérivées partielles non lineaires», Acta Matematica 88, 141-225.

Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L. y Turlay, R. (1964), «Evidence for the 2π decay of the $K^0 2$ meson», Physical Review Letters 12, 138-140.

Christianson, Gale E. (1995), Edwin Hubble, Mariner of the Nebulae, Nueva York, Farrar, Strauss and Giroux.

Chu, Paul C. W. (1987), «Superconductivity above 90 K», Proceedings of the National Academy of Sciences 84, 4681-4682.

Chwolson, Orest (1924), «Über eine mögliche Form fiktiver Doppelsterne», Astronomische Nachrichten 221, 329-330.

Cirac, Ignacio y Zoller, Peter (1995), «Quantum computations with cold trapped ions», Physical Review Letters 74, 4091-4094.

Clarke, Arthur C. (1945), «Peacetime uses for V2?», Wireless World 51 (nº. 2), 58.

Clauser, John F., Horne, Michael A., Shimony, Abner y Holt, Richard A. (1969), «Proposed experiment to test local hidden-variable theories», Physical Review Letters 22, 880-884.

Cleeton, C. E. y Williams, N. H. (1934), «Electromagnetic waves of 1.1 cm. wave-length and the absorption spectrum of Ammonia», Physical Review 45, 234-237.

Cocconi, Giuseppe y Morrison, Philip (1959), «Searching for interstellar communications», Nature 184, 844-846).

Cockrof, John D. y Walton, Ernest T. S. (1932), «Experiments with high velocity ions II. The disintegration of elements by high velocity protons», Proceedings of the Royal Society of London A 127, 23-38.

Cohen, Robert S. y Stachel, John, eds. (1979), Selected Papers of Léon Rosenfeld, Dordrecht, Reidel.

Collins, R. J., Nelson, D. F., Schawlow, A. L., Bond, W., Garret, C. G. B. y Kaiser, W. (1960), «Coherence, narrowing, directionality, and relaxation oscillations in the light emission from ruby», Physical Review Letters 5, 303-305.

Compton, Arthur H. (1945), «Modern physics and the discovery of X-rays», Radiology 457, 534-538.

Cooper, Leon N. (1956), «Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas», Physical Review 104, 1189-1190 (L).

Cork, B., Lamberston, G. R., Piccioni, O. y Wenzel, W. A. (1956), «Antineutrons produced from antiprotons in charge-exchange collisions», Physical Review 104, 1193-1197.

Cornell, Eric A. y Carl E. Wiemann (2003), «El condensado de Bose-Einstein»,

Investigación y Ciencia. Temas 31 (primer trimestre), 82-87.

Correy, Leo, Renn, Jürgen y Stachel, John (1997), «Belated decision in the Hilbert-Einstein priority dispute», Science 278, 1270-1273.

Courant, E., Livingston, M. S. y Snyder, H. S. (1952), «The strong-focussing synchrotron-A new high energy accelerator», Physical Review 88, 1190-1196.

Courant, Richard y Hilbert, David (1924), Methoden der mathematischen Physik, 2 vols., Berlín, Verlag von Julius Springer.

Cowan, C.L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W. y Mcguire, A. D. (1956), «Detection of the free neutrino: a confirmation», Science 124, 103-104.

Crease, Robert P. y Mann, Charles C. (1996), The Second Creation. Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics, New Brunswick, Rutgers University Press.

Crick, Francis (1989), Qué loco propósito, Barcelona, Tusquets Editores (edición original en inglés de 1988).

Cronin, James W., ed. (2004), Fermi Remembered, Chicago, The University of Chicago Press.

Curie, Pierre (1895), «Propriétés magnétiques des corps à divers températures», Annales de Chimie et de Physique 5, 289-405.

Danby, G., Gaillard, J-M., Goulianos, K, Lederman, L. M., Mistry, N., Schwartz, M. y Steinberger, J. (1962), «Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos», Physical Review Letters 9, 36-44.

Darmois, George (1927), Les équations de la gravitation einsteinienne, París, Gauthier-Villars.

Davis, jr., Raymond (1964), «Solar neutrinos. II. Experimental», Physical Review Letters 12, 303-305.

Davis, K. B., Mewes, M.-O., Andrews, M. R., van Druten, N. J., Durfee, D. S., Kurn, D. M. y Ketterle, W. (1995), «Bose-condensation in a gas of Sodium atoms», Physical Review Letters 75, 3969-3973.

Debever, Robert, ed. (1979), Elie Cartan-Albert Einstein. Letters on Absolute Parallelism, 1929-1922, Princeton, Princeton University Press.

De Broglie (1924), Recherche sur la théorie des quanta. Thèses presentées à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris pour obtenir le grade de docteur ès sciences physiques par Louis de Broglie, París, Masson.

Deichmann, Ute (2007), «A brief review of the early history of genetics and its relationship to physics and chemistry», en Wenkel y Deichmann, eds. (2007: 3-18).

Delbrück, Max (1989), Mente y materia, Madrid, Alianza Editorial (edición original en inglés de 1986).

De Maria, Michelangelo, Grilli, Mario y Sebastiani, Fabio, eds. (1989), The Restructuring of Physical Sciences in Europe and the United States 1945-1960, Singapur, World Scientific.

Dennison, David M. y Uhlenbeck, George E. (1932), «The two-minima problem and the Ammonia molecule», Physical Review 41, 313-321.

De Sitter, Willem (1917), «On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences III», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 78, 3-28.

DeVorkin, David H. (1989) «Along the ride: the response of American astronomers to the possibility of space research, 1945-1950», in De Maria, Grilli y Sebastiani, eds. (1989: 55-74).

—, (1997), «Oral interview transcript - Dr. Jan Hendrik Oort», Niels Bohr Library & Archives, Center for History of Physics, American Institute of Physics.

—, (2000), «Who speaks for astronomy? How astronomers responded to government funding after World War II», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 21, 55-92.

DeWitt, Bryce (1970), «Quantum mechanics and reality», Physics Today 22 (septiembre), 155-165.

DeWitt, Bryce y Graham, Neill, eds. (1973), The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, Princeton, Princeton University Press.

DeWitt, Cécile M., ed. (1957), Conference on the Role of Gravitation in Physics, WADC Technical Report 57-216. Reeditado en DeWitt y Rickles, eds. (2011).

DeWitt, Cécile M. y Rickles, Dean, eds. (2011), The Role of Gravitation in Physics. Report from the 1957 Chapel Hill Conference, Berlín, Edition Open Access.

DeWitt, Cécile y Wheeler, John A., eds. (1968), Battelle Rencontres. 1967 Lectures in Mathematics and Physics, Nueva York, W. A. Benjamin.

DeWitt-Morette, Cécile (2011), The Pursuit of Quantum Gravity. Memoirs of Bryce DeWitt from 1946 to 2004, Heidelberg, Springer.

Dicke, Robert H., Beringer, Robert, Kyhl, Robert L. y Vane, A. B. (1946), «Atmospheric absortion measurements with a microwave radiometer», Physical Review 70, 340-348.

Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G. y Wilkinson, T. D. (1965), «Cosmic black-body radiation», Astrophysical Journal 142, 414-419.

Dirac, Paul A. M. (1925), «The fundamental equations of quantum mechanics», Proceedings of the Royal Society (London) A 109, 642-653.

—, (1927), «The quantum theory of the emission and absorption of radiation», Proceedings of the Royal Society (London) A 114, 243-265.

—, (1928 a), «The quantum theory of the electron», Proceedings of the Royal Society (London) A 117, 610-624.

—, (1928 b), «The quantum theory of the electron. Part II», Proceedings of the Royal Society (London) A 118, 351-361

—, (1929), «Quantum mechanics of many-electron systems», Proceedings of the Royal Society (London) A 122, 714-733.

—, (1930), «A theory of electrons and protons», Proceedings of the Royal Society (London) A 126, 360-365.

—, (1931), «Quantised singularities in the electromagnetic field», Proceedings of the Royal Society (London) A 122, 60-72.

—, (1939), «The relation between mathematics and physics», Proceedings of the Royal Society (Edinburgh) 59, 122-129.

—, (1943), Quantum Electrodynamics, Dublín, The Dublin Institute of Advanced Studies.

—, (1948), «The theory of magnetic monopoles», Physical Review 74, 817-830.

—, (1977), «Recollections of an exciting era», en Weiner, ed. (1977: 209-146).

—, (1978), «The mathematical foundations of quantum theory», en Marlow, ed. (1978: 1-8).

—, (1983), «The origin of quantum field theory», en Brown y Hoddeson, eds. (1983: 39-55).

—, (1991), «Métodos empleados en la física teórica», en Salam, Heisenberg y Dirac (1991: 171-192).

Doncel, Manuel G., Hermann, Armin, Michel, Louis y Pais, Abraham, eds. (1987), Symmetries in Physics (1600-1980), Bellaterra (Barcelona), Seminari d'Història de les Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona.

Dresden, Max (1987), H. A. Kramers. Between Tradition and Revolution, Nueva York, Spinger-Verlag.

Dupree, A. Hunter (1957), Science in the Federal Government, Cambridge, Mass., Belknap Press of Harvard University Press.

Dyson, Freeman (1949 a), «The radiation theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman», Physical Review 75, 486-502.

—, (1949 b), «The S matrix in quantum electrodynamics», Physical Review 75, 1736-1755.

—, (1996), Selected Papers of Freeman Dyson, with Commentary, Providence, American Mathematical Society.

Earman, John (1999), «The Penrose-Hawking singularity theorems: history and implications», en Goenner, Renn, Ritter y Sauer, eds. (1999: 235-267).

Eckert, Michael y Schubert, Helmut (1991), Cristales, electrones y transistores, Madrid, Alianza Editorial (edición original en alemán de 1986).

Eddington, Arthur S. (1916), «The kinetic energy of a star cluster», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 76, 525-528.

—, (1920), Space, Time and Gravitation, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1921), «A generalization of Weyl's theory of the electro-magnetic and gravitational fields», Proceedings of the Royal Society A99, 104-122.

—, (1923), The Mathematical Theory of Relativity, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1926), The Internal Constitution of Stars, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1927), Stars and Atoms, Oxford, Clarendon Press.

—, (1928), Estrellas y átomos, Madrid, Revista de Occidente.

—, (1933), La expansión del Universo (Revista de Occidente, Madrid; edición original en inglés de 1933).

—, (1935), «Relativistic degeneracy», The Observatory 58, 37-39.

—, (1988), The Internal Constitution of Stars, Cambridge, Cambridge University Press.

Edge David O. y Mulkay, Michael J. (1976), Astronomy Transformed. The Emergence of Radio Astronomy in Britain, Nueva York, John Wiley & Sons.

Einstein, Albert (1905 a), «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt», Annalen der Physik 17, 132-148.

—, (1905 b) «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», Annalen der Physik 17, 891-921.

—, (1905 c), «Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energienhalt abhängig?, Annalen der Physik 18, 639-641.

—, (1907), «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen», Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4, 411-462.

—, (1915), «Die Feldgleichungen der Gravitation», Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 844-847.

—, (1916 a), «Näherungsweise integration der Feldgleichungen der gravitation», Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 688-696.

—, (1916 b), «Strahlungs -Emission und -Absorption nach der Quantentheorie», Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen 18, 318-323.

—, (1916 c), «Zur Quantentheorie der Strahlung», Physikalische Gesellschaft Zürich. Mitteilungen 18, 47-62. Publicado también en Physikalische Zeitschrift 18 (1917): 121-128.

—, (1917), «Kosmologische Betrachtungen zur allegemeinen Relativitätstheorie», Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 142-152.

—, (1924), «Quantentheorie des einatomigen idealen Gases», Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 261-267.

—, (1925), «Quantentheorie des einatomigen idealen gases. 2. Abhandlung», Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 3-14.

—, (1928a), «Riemann-Geometrie mit Aufrechterhaltung des Begriffes des Fernparallelismus», Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 217-221.

—, (1928b), «Neue Möglichkeit für eine einheitliche Feld-theorie von Gravitation und elektrizität», Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 224-227.

—, (1936), «Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field», Science 84, 506-507.

—, (1933), On the Method of Theoretical Physics, Oxford, Clarendon Press, Oxford.

—, (1936), «Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field», Science 84, 506-507.

—, (1949), «Autobiographical Notes/Autobiographisches», en Schilpp, ed. (1949: 2-94)

—, (2000 a), Ideas y Opiniones, Barcelona, Bon Ton.

—, (2000 b), «Sobre el método de la física teórica», en Einstein (2000 a: 242-247).

Einstein, Albert y Bergmann, Peter (1938), «On a generalisation of Kaluza's theory of electricity», Annals of Mathematics 29, 683-701.

Einstein, Albert y Grommer, Jakob (1923), «Beweis der Nichtexistenz eines überall regulären zentrisch symmetrischen Feldes nach der Feld-Theorie von Th Kaluza», Scripta Universitatis Atque Bibliothecae Hierosolymitanarum, 1-5.

Einstein, Albert y Mayer, Walther (1931 a), «Systematische untersuchung über kompatible feldgleichungen welche in einem Riemannschen räume mit fern-parallelismus gesetzt warden könen», Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 257-265.

—, (1931 b), «Einheitliche theorie von gravitation und elektrizität», Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 541-557.

Einstein, Albert, Podolsky, Boris y Rosen, Nathan (1935), «Can quantummechanical description of physical reality be considered complete?», Physical Review 47, 777-780.

Eisenhower, Dwight D. (1963), The White House Years. A Personal Account. 1952-1956: Mandate for Change (Doubleday, Nueva York).

Eisenstaedt, J. y Kox, A. J., eds. (1992), Studies in the History of General

Relativity, Boston, Birkhäuser.

Électrons et Photons (1928), Rapports et discussions du Cinquiéme Conseil Solvay, París, Gauthier-Villars.

Ellis, Emory L. y Delbrück, Max (1939), «The growth of bacteriophage», Journal of General Physiology 22, 365-384.

Elssaser, Walter (1939), «On the origin of the Earth's magnetic field», Physical Review 55, 489-498.

Englert, François y Brout, Robert (1964), «Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons», Physical Review Letters 12, 321-323.

Everett, III, Hugh (1957), «"Relative state" formulation of quantum mechanics», Reviews of Modern Physics 29, 454-462.

Ewen, Harold I. y Purcell, Edwin M. (1951), «Observation of a line in the Galactic radio spectrum: radiation from galactic hydrogen at 1,420 Mc/sec», Nature 168, 356-358.

Farmelo, Graham (2009), The Strangest Man. The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom, Nueva York, Basic Books.

Fath, Edward (1909), «The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters», Lick Observatory Bulletin, n.º 149, 71-77.

Feferman, Solomon et al, eds. (1990), Kurt Gödel Collected Works, vol. II («Publications 1938-1974»), Nueva York, Oxford University Press.

Fermi, Enrico (1933), «Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"», Ricerca Scientifica 4, 491-495.

—, (1934) «Versuch einer Theorie der β-Strahlen. I», Zeitschrift für Physik 88, 161-177.

—, (1965 a), Collected Papers (Note e memorie), vol. II, Chicago-Roma, The University of Chicago Press-Accademia Nazionale dei Lincei.

—, (1965 b), «Fundamental particles», en Fermi (1965 a: 825-828).

Fermi, Enrico y Yang, Chen Ning (1949), «Are mesons elementary particles?», Physical Review 76, 1739-1743.

Feynman, Richard P. (1949 a), «The theory of positrons», Physical Review 76, 749-759.

—, (1949 b), «Space-time approach to quantum electrodynamics», Physical Review 76, 769-789.

—, (1953), «Atomic theory and the lambda transition in liquid helium», Physical Review 91, 1291-1301.

—, (1954 a), «Atomic theory of the two-fluid model of liquid helium», Physical Review 94, 262-277.

—, (1954 b), «Application of quantum mechanics to liquid helium», Progress in Low Temperature Physics, vol. I, Amsterdam, North-Holland, 17-53.

—, (1960), «There's plenty of room at the bottom: An invitation to enter a new field of physics», Engineering and Science 22 (5), 22-36.

—, (1963), «The quantum theory of gravitation», Acta Physica Polonica 24, 697-722).

—, (1969), «The behavior of hadron collisions at extreme energies», en High Energy Collisions, Londres, Gordon and Breach, pp. 237-256.

—, (1972), «The development of the space-time view of quantum electrodynamics (1965 Nobel Lecture)», en Nobel Lectures 1963-1970 (1972: 155-178).

—, (1987), ¿Está Ud. de broma, Sr. Feynman?, Madrid, Alianza Editorial (versión original en inglés de 1985).

—, (1990), ¿Qué te importa lo que piensen los demás?, Madrid, Alianza Editorial (versión original en inglés de 1988).

—, (1995 a), Six Easy Pieces, Reading, Mass., Addison-Wesley.

—, (1995 b), Feynman's Lectures on Gravitation, Brian Hatfield, ed., Reading,

Mass, Addison-Wesley.

—, (1996), Feynman's Lectures on Computation, Anthony J. G. Hey y Robin W. Allen, eds., Reading, Mass, Addison-Wesley. Existe traducción al español: Conferencias sobre computación, Barcelona, Crítica (2003).

—, (2006), ¡Ojalá lo supiera!, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 2005).

Feynman, Richard P. y Gell-Mann, Murray (1958), «Theory of the Fermi interaction», Physical Review 109, 193-198.

Feynman, Richard P. y Hibbs, Albert R. (1965), Quantum Mechanics and Path Integrals, Nueva York, McGraw-Hill.

Field, G. B., Arp, H. y Bahcall, J. N. (1973), The Redshift Controversy (W. A. Benjamin, Reading, Mass.).

Fischer, David (1997), History of the Atomic Energy Agency. The First Forty Years. Viena, Iaea.

Fock, Vladimir (1930), «Näherungsmethode zur des quantenmechanischen Mehrkörperproblems», Zeitschrift für Physik 61, 126-148.

Forman, Paul (1987), «Behind quantum electronics: national security as basis for physical research in the United States», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 18, 1940-229.

—, (1991), «Independence, not transcendence, for the historian of science», Isis 82, 71-86.

—, (1992), «Inventing the maser in post-war America», Osiris 7, 338-267.

—, (1996), «Into quantum electronics: the maser as "gadget" of Cold-War America», en Forman y Sánchez Ron, eds. (1996: 261-326).

Forman, Paul y Sánchez Ron, José M., eds. (1996), National Military Establishments and the Advancement of Science and Technology, Dordrecht, Kluwer.

Fowler, Ralph H. (1926), «On dense matter», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 87, 114-122.

Frank, Philipp, «Einstein's philosophy of science», Reviews of Modern Physics 21, 349-355.

Frankel, Henry (2009), «Plate tectonics», en Bowler y Pickstone, eds. (2009: 385-394).

Franklin, Rosalind E. y Gosling, Raymond G. (1953), «Evidence for 2-chain helix in crystalline structure of sodium deoxyrribonucleate,» Nature 172, 156-157.

Fraser, Gordon, ed. (1998), The Particle Century, Bristol, Institute of Physics Publishing.

Frauenfelder, Hans, Wolynes, Peter G. y Austin, Robert H. (1999), «Biological physics», Reviews of Modern Physics 71, S419-S430.

Freire, jr., Olival (2005), «Science and exile: David Bohm, the cold war, and a new interpretation of quantum mechanics», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 26, 1-34.

Freud, Sigmund (1921), Massenpsychologie und Ich-Analyse, Leipzig, Internationaler Psychoanalytischer Verlag.

—, (1930), Das Unbehagen in der Kultur, Viena, Internationaler Psychoanalytischer Verlag.

—, (1965 a), Obras completas, vol. I, Madrid, Editorial Biblioteca Nueva.

—, (1965 b), Psicología de las masas, en Freud (1965 a: 1127-1165).

—, (1965 c), El malestar de la cultura, en Freud (1965 a: 1-65).

Freundlich, Martin (1963), «Origin of the electron microscope», Science 142, 185-188.

Friedmann, Alexander (1922), «Über die Krümmung des Raumes», Zeitschrift für Physik 10, 377-386.

Fritzsch, Harald y Gell-Mann, Murray (1972), «Current algebra: quarks and what else?», en Jackson y Roberts, eds. (1972: vol. II, 135-165).

Fukuda, Y. et al. (1998), «Measurements of the Solar neutrino flux from Super-Kamiokande's first 300 days», Physical Review Letters 81, 1158-1162.

Galindo, Alberto (2009), «De gatos, juegos y estadísticas a la teleportación cuántica», Revista de la Real Academia de Ciencias 102, 305-322.

Galison, Peter y Hevly, Bruce, eds. (1992), Big Science. The Growth of Large-Scale Research, Stanford, Stanford University Press.

Gamow, George (1932), «Nuclear transformations and the origin of the chemical elements», Ohio Journal of Science 25, 406-414.

—, (1937), Structure of Atomic Nuclei and Nuclear Transformations, Oxford, Clarendon Press.

—, (1946), «Expanding universe and the origin of elements», Physical Review 70, 572-573.

—, (1970), My World Line. An Informal Autobiography, Nueva York, The Viking Press.

Garwin, Laura y Lincoln, Tim, eds. (2003), A Century of Nature. Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World, Chicago, The University of Chicago Press.

Gavroglu, Kostas y Simões, Ana (2012), Neither Physics nor Chemistry. A History of Quantum Chemistry Cambridge, Mass., The Mit Press.

Gell-Mann, Murray (1953), «Isotopic spin and new unstable particles», Physical Review 92, 833-834.

—, (1961), «The eightfold way: a theory of strong interaction symmetry», Report Ctsl-20.

—, (1962), «Symmetries of baryons and mesons», Physical Review 125, 1067-1084.

—, (1964), «A schematic model of baryons and mesons», Physics Letters 8, 214-215.

—, (1995), El quark y el jaguar, Barcelona, Tusquets (edición original en inglés de 1994).

—, (1997), «Quarks, color, and QCD», en Hoddeson, Brown, Riordan y Dresden, eds. (1997: 625-633).

Gell-Mann, M. y Ne'eman, Y. (1964), The Eightfold Way, Nueva York, W. A. Benjamin.

Georgi, Howard y Glashow, Sheldon L. (1974), «Unity of all elementary particle forces», Physical Review Letters 22, 438-441.

Gertner, Jon (2012), The Idea Factory. Bell Labs and the Great Age of American Innovation, Nueva York, The Penguin Press.

Giacconi, Ricardo, Gursky, Herbert, Paolini, Frank R. y Rossi, Bruno B. (1962), «Evidence for X rays from sources outside the Solar System», Physical Review Letters 9, 439-443.

Gibbons, G. W., Shellard, E. P. S. y Rankin, S. J., eds. (2003), The Future of Theoretical Physics and Cosmology. Celebrating Stephen Hawking 60th Birthday, Cambridge, Cambridge University Press.

Gilder, Louisa (2008), The Age of Entanglement, Nueva York, Alfred A. Knopf.

Gingerich, Owen (2002), An Annotated Census of Copernicus' De revolutionibus (Nuremberg, 1542 and Basel, 1566), Leiden, Brill.

—, (2004), «The Book Nobody Read». Chasing the Revolutions of Nicolaus Copernicus, Nueva York, Walker.

Giudice, Gian Francesco (2010), A Zeptospace Odyssey. A Journey into the Physics of the LHC, Oxford, Oxford University Press.

Giuliani, G., ed. (1988), The Origins of Solid-State Physics in Italy: 1945-1960, Bolonia, Società Italiana di Fisica.

Glashow, Sheldon L. (1960), «Partial-symmetries of weak interactions», Nuclear Physics 22, 579-588.

Gleick, James (1987), Caos: La creación de una nueva ciencia, Barcelona, Seix Barral.

—, (1992), Genius. The Life and Science of Richard Feynman, Nueva York, Pantheon Books.

Gödel, Kurt (1949), «An example of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations of gravitation», Reviews of Modern Physics 21, 447-450.

Goenner, Hubert, Renn, Jürgen, Ritter, Jim y Sauer, Tilman, eds. (1999), The Expanding Worlds of General Relativity, Boston, Birkhäuser.

Gold, Thomas (1968), «Rotating neutron stars as the origin of the pulsating radio sources», Nature 218, 731-732.

Goldberg, Josua N. (1992), «US Air Force support of General Relativity: 1956-1972», en Eisenstaedt y Kox, eds. (1992: 89-102).

Good, Gregory A. (2010), «Rutherford's geophysicists», Physics Today 62 (Julio), 43-47.

Goodstein, Judith (1999), «A conversation with Hans Bethe», Physics in Perspective 1, 253-281.

Gordon, Walter (1926), «Der Comptoneffekt nach der Schrödingerschen Theorie», Zeitschrift für Physik 40, 117-133.

Gordon, James P., Zeiger, Herbert J. y Townes, Charles H. (1954), «Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH3», Physical Review 95, 282-284 (L).

—, (1955), «The maser - new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer», Physical Review 99, 1264-1274.

Gray, Jeremy J., ed. (1999), The Symbolic Universe. Geometry and Physics 1890-1920, Oxford, Oxford University Press.

Green, Michael (2003), «A brief description of string theory», en Gibbons, Shellard y Rankin, eds. (2003: 473-483).

Greene, Brian (2001), El Universo elegante, Crítica/Planeta, Barcelona (edición original en inglés de 1999).

Greenberg, Daniel S. (1999), The Politics of Pure Science, Chicago, The University of Chicago Press.

Greenstein, Jesse L., «An astronomical life», en Lederberg, comp. (1990: 139-173).

Greenstein, J., Henyey, L. y Keenan, P. G. (1946), «Interstellar origin of cosmic radiation at radio-frequencies», Nature 157, 805-806.

Greenstein, J. y Matthews, T. A. (1963), «Red-shift of the unusual radio source 3C 48», Nature 197, 1041-1042.

Griliches, Z., ed. (1984), R&D, Patents and Productivity, Chicago, The University of Chicago Press.

Griliches, Z. y Lichtenberg, F. (1984), «R&D and productivity at the industry level: is there still a relationship?», en Griliches, ed. (1984: 465-496).

Grivov, Vladimir N. y Pontecorvo, Bruno (1969), «Neutrino astronomy and lepton charge» Physics Letters B 28, 493-496.

Gross, David (1997), «Asymptotic freedom and the emergence of QCD», en Hoddeson, Brown, Riordan y Dresden, eds. (1997: 199-232).

—, (2003), «String theory», en Gibbons, Shellard y Rankin, eds. (2003: 463-472).

Gross, David J. y Wilczek, Frank (1973), «Ultraviolet behavior of non-Abelian gauge theories», Physical Review Letters 20, 1343-1346.

Gouth, Douglas, ed. (2005), The Scientific Legacy of Fred Hoyle, Cambridge, Cambridge University Press.

Guralnik, Gerald S., Hagen, Carl R. y Kibble, Thomas W. (1964), «Global

conservation laws and massless particles», Physical Review Letters 12, 585-587.

Guth, Alan H. (1981), «Inflationary universe: a possible solution to the horizon and flatness problems», Physical Review D 22, 347-356.

—, (1999), El universo inflacionario, Madrid, Debate (edición original en inglés de 1997).

Guth, Alan H. y Tye, Henry S. H. (1980), «Phase transitions and monopole production in the very early universe», Physical Review Letters 49, 631-635

Hahn, Otto y Strassmann, Fritz (1939), «Über den Nachweis und das Verhalten der bei Bersestrahlung des urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle», Naturwissenschaften 27, 11-15.

Hargittai, Magdolna (2012), «Credit where credit's due?», Physics World 25 (septiembre), 38-43.

Hardy, Godfrey H. (1999), Apología de un matemático, Madrid, Nivola (edición original en inglés de 1940).

Harish-Chandra (1987), «My association with Professor Dirac», en Kursunoglu y Wigner, eds. (1987: 34-36).

Hartree, Douglas R. (1928 a), «The wave mechanics of an atom with a non-Coulomb central field, I. Theory and methods», Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 24, 89-110.

—, (1928 b), «The wave mechanics of an atom with a non-Coulomb central field, II. Some results and discussion», Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 24, 111-132.

—, (1928 c), «The wave mechanics of an atom with a non-Coulomb central field, III. Term values and intensities in series in optical spectra», Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 24, 426-437.

Hatfield, Brian (1995), «Quantum gravity», en Feynman (1995 b: xxxi-xl).

Havas, Peter (1973), «The connection between conservation laws and invariance groups: folklore, fiction, and fact», Acta Physica Austriaca 28, 145-167.

Hawking, Stephen W. (1965), «Occurrence of singularities in open universes», Physical Review Letters 15, 689.

—, (1966 a), «The occurrence of singularities in cosmology», Proceedings Royal Society A 294, 511-521.

—, (1966 b), «The occurrence of singularities in cosmology, II», Proceedings Royal Society A 295, 490-493.

—, (1972), «Black holes in general relativity», Communications in Mathematical Physics 25, 152-166.

—, (1975 a), «Particle creation by black holes», en Isham, Penrose y Sciama, eds. (1975: 219-267).

—, (1975 b), «Particle creation by black holes», Communications in Mathematical Physics 42, 199-220.

—, (1988), Historia del tiempo, Barcelona, Crítica (edición original en inglés —A Brief History of Time— de 1988).

—, (1990), «Introductory note to 1949 ad 1952», en Feferman et al, eds. (1990: 189-190).

—, (2011), «La teoría clásica», en Hawking y Penrose (2011: 11-40).

—, (2014), Breve historia de mi vida, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 2013).

Hawking, Stephen y Ellis, George F. R. (1973), The Large Scale Structure of Space-Time. Cambridge, Cambridge University Press.

Hawking, Stephen W. y Penrose, Roger (1969), «The singularities of gravitational collapse and cosmology», Proceedings of the Royal Society of London A 214, 529-548.

—, (1993), Cuestiones cuánticas y cosmológicas, edición de José M. Sánchez Ron, Madrid, Alianza Editorial.

—, (2011), La naturaleza del espacio y el tiempo, Barcelona, Debate (edición

original en inglés de 1996).

Hazard, C., Mackey, M. B. y Shimmins, A. J. (1963), «Investigation of the radio source 3C 273 by the method of the Lunar occultations», Nature 197, 1037-1039.

Hecht, Jeff (1992), Laser Pioneers, San Diego, Academic Press.

Heilbron, John L. Seidel y Robert W. (1989), Lawrence and his Laboratory. A History of the Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, University of California Press.

Heisenberg, Werner (1925), «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», Zeitschrift für Physik 22, 87.

—, (1926), «Mehrkörperproblem und Resonanz in der Quantenmechanik», Zeitschrift für Physik 28, 411-426.

—, (1927), «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», Zeitschrift für Physik 42, 172-198. Reproducido, traducido al inglés, en Wheeler y Zurek (1983: 62-84).

—, (1932 a), «Über den Bau der Atomkerne, I», Zeitschrift für Physik 7, 1-11.

—, (1932 b), «Über den Bau der Atomkerne, II», Zeitschrift für Physik 78, 156-164.

—, (1933), «Über den Bau der Atomkerne, III», Zeitschrift für Physik 80, 587-596.

—, (1943), «Die beobachtbaren größen in der theorie der elementarteilchen», Zeitschrift für Physik 120, 513-538.

—, (1973), «Development of concepts in the history of quantum theory», en Mehra ed. (1973: 246-275).

Heisenberg, Werner y Pauli, Wolfgang (1929), «Zur Quantenelektrodynamik der Wellenfelder. I», Zeitschrift für Physik 56, 1-61.

Heitler, Walter y London, Fritz (1927), «Wechselwirkung neutraler Atome und

homöpolare Bindung nach der Quantenmechanik», Zeitschrift für Physik 44, 455-472.

Hermann, A., Krige, J., Mersits, U. y Pestre, D. (1987), History of CERN, vol. 1 (Launching the European Organization for Nuclear Research), Amsterdam, North-Holland.

—, (1990), History of CERN, vol. II (Building and Running the Laboratory, 1954-1965), Amsterdam, North-Holland.

Hess, Victor F. (1912), «Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten», Physikalische Zeitschrift 12, 1084-1091.

Hessenberg, Gerhard (1917), «Vektorielle Begründung der Differentialgeometrie», Mathematische Annalen 78, 187-217

Hettema, H., ed. (2000), Quantum Chemistry. Classic Scientific Papers, Singapur, World Scientific.

Heuer, Rolf (2013), «Ciencia para innovar y para vivir mejor», El País (1 de agosto).

Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F. y Collins, R. A. (1968), «Observation of a rapidly pulsating radio source», Nature 217, 709-713.

Hey, James S. (1971), The Radio Universe, Oxford, Pergamon Press.

Higgs, Peter W. (1964 a), «Broken symmetries, massless particles and gauge fields», Physics Letters 12, 132-201.

—, (1964 b), «Broken symmetries and the masses of gauge bosons», Physical Review Letters 12, 508-509.

—, (1966), «Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons», Physical Review 145, 1156-1163.

Hilbert, David (1915), «Die Grundlagen der Physik, (Erste Mitteilung)», Nachrichten der königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse, pp. 395-407.

Hittmair, Otto (1987), «Schrödinger's unified field theory seen 40 years later, en Kilmister, ed. (1987: 165-175).

Hjellming, R. y Wade, C. (1971), «Further radio observations of Scorpius X-1», Astrophysical Journal 170, 523-528.

Hobsbawm, Eric (2003), Años interesantes. Una biografía del siglo XX, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 2002).

—, (2012), Historia del siglo XX, Barcelona, Crítica (edición original en inglés, con el título Age of Extremes, the Short Twentieth Century, 1914-1991, de 1994).

Hoch, Paul (1992), «The development of the band theory of solids, 1933-1960», en Hoddeson, Braun, Teichmann y Weart, eds. (1992: 182-235).

Hoddeson, Lillian (1981), «The discovery of the point-contact transistor», Historical Studies in the Physical Sciences 12, 41-76.

Hoddeson, Lillian, Braun, Ernest, Teichmann, Jürgen y Weart, Spencer, eds. (1992), Out of the Crystal Maze. Chapters from the History of Solid-State Physics, Nueva York, Oxford University Press.

Hoddeson, Lillian, Brown, Laurie, Riordan, Michael y Dresden, Max, eds. (1997), The Rise of the Standard Model, Cambridge, Cambridge University Press.

Hoddeson, Lillian y Daitch, Vicki (2002), True Genius. The Life and Science of John Bardeen, Washington D.C, Joseph Henry Press.

Hoddeson, Lillian, Kolb, Adrienne W. y Wesfall, Catherine (2008), Fermilab. Physics, the Frontier & Megascience, Chicago, The University of Chicago Press.

Holmes, Arthur (1927), The Age of the Earth, an Introduction to Geological Ideas, Londres, E. Benn.

Hoyle, Fred (1948), «A new model for the expanding universe». Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 108, 372-382.

—, (1994), Home is Where the Wind Blows. Chapters from a Cosmologist's

Life, Mill Valley, Cal., University Science Books.

Hoyle, Fred y Narlikar, Jayant (1961), «On the counting of radio sources in the steady-state cosmology», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 122, 133-142.

—, (1974), Action at a Distance in Physics and Cosmology, San Francisco, W. H. Freeman.

Hubble, Edwin (1929), «A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae», Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A. 15, 168-173. Reproducido parcialmente en Shapley, ed. (1960: 330-334).

—, (1942), «The problem of the expanding universe», American Scientist 20, 99-115.

Hubble, Edwin y Humason, Milton L. (1931), «The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae», Astrophysical Journal 74, 43-80. Reproducido parcialmente en Shapley, ed. (1960: 335-336).

Hufbauer, Karl (2005), «J. Robert Oppenheimer's path to black holes», en Carson y Hollinger, eds. (2005: 31-47).

—, (2007), «Landau's youthful sallies into stellar theory: their origins, claims, and receptions», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 37, 337-354.

Huggins, William (1897), «The new astronomy. A personal retrospect», Nineteenth Century. A Monthly Review 41, 907-929.

Hulse, Russell A. y Taylor, Joseph H. (1975), «Discovery of a pulsar in a binary system», Astrophysical Journal 195, L51-L53.

Hund, Hund, (1926), «Zur deutung einiger erscheinungen in den molekelspektren», Zeitschrift für Physik 26, 657-674.

—, (1927), «Zur Deutung der Molekelspektren, I, II», Zeitschrift für Physik 40, 742-764; 42, 93-120.

Infeld, Leopold, ed. (1964), Relativistic Theories of Gravitation, París/Oxford,

Gauthier-Villars/Pergamon Press.

Isham, Chris J., Penrose, Roger y Sciama, Dennis W., eds. (1975), Quantum Gravity. An Oxford Symposium, Oxford, Oxford University Press.

—, (1981), Quantum Gravity 2, Oxford, Clarendon Press.

International Conference ON Physics (1935), Papers & Discussions. Vol. I. Nuclear Physics, Londres/Cambridge, The Physical Society/Cambridge University Press.

Ito, D., Koba, Z. y Tomonaga, S. (1947), «Corrections due to the reaction of "cohesive force field" for the elastic scattering of an electron», Progress in Theoretical Physics 2, 216-217.

Jackiw, Roman y Shimony, Abner (2002), «The depth and breadth of John Bell's physics», Physics in Perspective 4, 78-116.

Jacobsen, Anja Skaar (2012), Léon Rosenfeld. Physics, Philosophy, and Politics in the Twentieth Century, Singapur, World Scientific.

Jackson, J. D. y Roberts, A., eds. (1972), Proceedings of the XVIth International Conference on High-Energy Physics, September 6-September 12, 1972, Batavia, National Accelerator Laboratory.

Jammer, Max (1974), The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective, Nueva York, Wiley-Interscience.

Jansky, Karl G. (1932), «Directional studies of atmospherics at high frequencies», Proceedings of the Institute of Radio Engineers 20, 1920-1932.

—, (1933a), «Electrical disturbance of extraterrestrial origin», Proceedings of the Institute of Radio Engineers 21, 1387-1398.

—, (1933b), «Electrical phenomena that apparently are of interstellar origin», Popular Astronomy 41, 549-555.

Jordan, Pascual (1927), «Zur Quantenmechanik des Gasentartung», Zeitschrift für Physik 44, 473-480.

Jordan, Pascual y Klein, Oskar (1927), «Zum mehrkörperproblem der quantemtheorie», Zeitschrift für Physik 45, 751-765.

Jordan, Pascual y Wigner, Eugene (1928), «Über das Paulische aequivalenzverbot», Zeitschrift für Physik 47, 631-651.

Josephson, Brian David (1962), «Possible new effects in superconductive tunnelling», Physics Letters 1, 251-253.

Jost, Res (1957), «Eine bemerkung zum CPT Theorem», Helvetica Physica Acta 20, 409-416

Jouvenel, Bertrand de (1998), Sobre el poder, Madrid, Unión Editorial (edición original en francés de 1945).

Juan Pablo II (1982), «Allocution of His Holiness John Paul II», en Brück, Coyne y Longair, eds. (1982: xxvii-xxxii).

Kaiser, David (2005), Drawing Theories Apart. The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics, Chicago, The University of Chicago Press.

Kaluza, Theodor (1921), «Zum Unitätsproblem der Physik», Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 966-972.

Kamerlingh Onnes, Heike (1911), «Further experiments with liquid helium. C. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperature. IV. The resistance of pure mercury at helium temperatures», Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden n.º 120a, 3-15.

Kapitza, Peter (1938), «Viscosity of liquid helium above the λ-point», Nature 141, 74.

Keeler, James E. (1894), «Spectroscopic observations of nebulae, made at Mount Hamilton, California, with the 36-inch refractor of the Lick Observatory», Publications Lick Observatory 2, part 4, 161-231.

Kernan, William J. (1968), Accelerators, Washington D.C., U.S. Atomic Commission.

Kerr, F. J. (1984), «Early days in radio and radar astronomy in Australia», en

Sullivan III, ed. (1984b: 133-145).

Kevles, Daniel (1978), The Physicists, Nueva York, Alfred A. Knopf.

—, (1997), «Big science and big politics in the United States: reflections on the death of the SSC and the life of the Human Genome Project», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 27, 269-297.

—, (1990), «Cold war and hot physics: science, security, and the American state, 1945-1956», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 20, 239-264.

Khalatnikov, Isaak M. (2012), From the Atomic Bomb to the Landau Institute. Autobiography. Top Non-Secret, Berlín Springer-Verlag.

Kilmister, Clive W., ed. (1987), Schrödinger. Centenary Celebration of a Polymath, Cambridge, Cambridge University Press.

Kistiakowsky, George B. (1976), A Scientist at the White House. The Private Diary of President Eisenhower's Special Assistant for Science and Technology, Cambridge, Mass., Harvard University Press.

Klein, Felix (1872), Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen, Erlangen, A. Deichert.

Klein, Oskar (1926), «Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie», Zeitschrift für Physik 27, 895-906.

Klybansky, Raymond, ed. (1958), Philosophy in the Mid-Century. A Survey, Florencia, La Nuova Italia editrice.

Knoll, Max y Ruska, Ernst (1932), «Das Elektronenmikroskop», Zeitschrift für Physik 78, 318-339.

Koba, Z. y Tomonaga, Sin-Itiro (1947), «Application of the "self-consistent" substraction method to elastic scattering of an electron», Progress in Theoretical Physics 2, 218.

Kojevnikov, Alexei B. (1993), «Paul Dirac and Igor Tamm Correspondence. Part I: 1928-1933», MPI-Ph/92-80.

—, (1999), «Freedom, collectivism, and quasiparticles: social metaphors in quantum physics», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 29, 295-331.

—, (2002), «David Bohm and collective movement», Historical Studies in the Physical and Bological Sciences 22, 161-192.

—, (2004), Stalin’s Great Science. The Times and Adventures of Soviet Physicists, Londres, Imperial College Press.

Kosmann-Schwarzbach, Yvette (2004), Les théoremes de Noether. Invariance et lois de conservation au XXe siècle, París, Les Éditions de l’École Polytechnique.

Kossel, Walther (1916), «Ueber Molekulbindung als Frage des Atombaues», Annalen der Physik 49, 229-362.

Kox, A. J. y Eisenstaedt, Jean, eds. (2005), The Universe of General Relativity, Boston, Birkhäuser.

Kragh, Helge (1982), «Erwin Schrödinger and the wave equation: the crucial phase», Centaurus 26, 154-197.

—, (1990), Dirac. A Scientific Biography, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1996), Cosmology and Controversy, Princeton University Press, Princeton.

—, (2007), Generaciones cuánticas, Madrid, Akal (edición original en inglés de 1999).

Krige, John, ed. (1996), History of CERN, vol. III, Amsterdam: North-Holland.

Krige, John y Pestre, Dominique, eds. (1997), Science in the Twentieth Century, Amsterdam, Harwood Academic Publishers.

Kuhn, Thomas S. (1957), The Copernican Revolution, Cambridge, Mass., Harvard University Press.

—, (1962), The Structure of Scientific Revolutions, Chicago, The University of Chicago Press.

—, (1971), La estructura de las revoluciones científicas, México D. F., Fondo de Cultura Económica.

Kursunoglu, Behram N. y Wigner, Eugene P., eds. (1987), Reminiscences about a Great Physicist: Paul Adrian Maurice Dirac, Cambridge, Cambridge University Press.

Kusch, Polycarp y Foley, Henry M. (1947), «Precision measurement of the ratio of the atomic "g values" in the 2P3/2 and 2P½ states in gallium», Physical Review 72, 1256-1257.

—, (1948), «The magnetic moment of the electron», Physical Review 74, 250-263.

Lacki, Jan, Ruegg, Henri y Wanders, Gérard, eds. (2009), E. C. G. Stueckelberg, an Unconventional Figure of Twentieth Century Physics, Basilea, Birkhäuser.

Lamb, Willis E, jr. (1983), «The fine structure of hydrogen», en Brown y Hoddeson, eds. (1983: 311-328).

Lamb, Willis E., jr. y Retherford, Robert C. (1947), «Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method», Physical Review 72, 241-243.

Lamb, W. E., Schleich, W. P., Scully, M. O. y Townes, C.H. (1999), «Laser physics: quantum controversy in action», Reviews of Modern Physics 71, S263-S273.

Landau, Lev (1932), «On the theory of stars», Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion 1, 285-287.

—, (1938) «Origin of stellar energy», Nature 141, 333-334.

—, (1941), «The theory of superfluidity of Helium II», Physical Review 60, 356-358 (publicado antes en Journal of Physics (Moscow) 8, 1-3, 1941).

Landau, Lev y Lifshitz, Evgeny (1966), Teoría clásica de los campos, Barcelona, Editorial Reverté.

—, (1991), Mecánica de fluidos, Barcelona, Editorial Reverté.

Landau, Lev y Peierls, Rudolf (1931), «Erweiterung des unbestimmtheisprinzips für die reaktivistische Quantentheorie», Zeitschrift für Physik 69, 56-69.

Langmuir, Irvin (1919), «The arrangement of electrons in atoms and molecules», Journal of the American Chemical Society 41, 868-934. Reproducido en Suits y Way, eds. (1961: 9-73).

—, (1921), «Future developments of theoretical chemistry», Chemical and Metallurgical Engineering 24. Reproducido en Suits y Way, eds (1962: 241-250).

Laplace, Pierre Simon (1796), Exposition du Système du Monde, París, Imprimerie du Cercle-Social.

—, (1799), «Beweis des satzes, dass die anziehende kraft bey einem weltkörper so gross seyn könne dass das licht davon nicht ausströmen kann», Allegemeine Geographische Ephemeriden 4, 1-6.

Lattes, C. M. G., Muirhead, H., Occhialini, G. P. S. y Powell, C. F. (1947), «Processes involving charged mesons», Nature 159, 694-697.

Lawrence, Ernest O. y Edlefsen, Niels E. (1930), «On the production of high speed protons» Science 72, 376-377.

Lawrence, Ernest O. y Livingston, M. Stanley (1932), «The production of high speed light ions without the use of high voltages», Physical Review 40, 19-35.

Leavitt, Henrietta (1912), «Periods of 25 variable stars in the small Magellanic cloud», Circular of the Astronomical Observatory of Harvard College 172, 1-3. Reproducido en Lightman (2005: 127-129).

Lécuyer, Christophe y Brock, David C. (2010), Makers of the Microchip. A Documentary History of Fairchild Semiconductor, Cambridge, Mass., The Mit Press.

Lederberg, Joshua, comp. (1990), The Excitement and Fascination of Science: Reflections by Eminent Scientists, vol. 3, parte 1, Palo Alto, Annual Reviews Inc.

Lederman, Leon y Teresi, Dick (1993), The God Particle. If the Universe is the Answer, What is the Question?, Nueva York, Houghon Mifflin Co (existe

traducción al español: Crítica 2004).

Lee, Sabine (2007), The Bethe-Peierls Correspondence, Singapur, World Scientific.

Lee, Tsung-Dao y Yang, Chen Ning (1956), «Question of parity conservation in weak interactions», Physical Review 104, 254-258.

Lehner, C., Renn, J. y Schemmel, M. eds. (2012), Einstein and the Changing World Views of Physics, Boston, Birkhäuser.

Lemaître, George (1927), «Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques», Annales de la Société Scientifique de Bruxelles 47, 49-59.

—, (1931), «The beginning of the world from the point of view of quantum theory», Nature 127, 706.

—, (1946), L'hypothèse de l'atome primitive, Neuchatel, Éditions du Griffon.

Lerner, Rita y Trigg, George L. eds. (1987), Enciclopedia de la Física, 2 vols., Madrid, Alianza Editorial (edición original en inglés de 1981).

Levi-Civita, Tullio (1917), «Nozione di parallelismo in una varietà qualunque e conseguente specificazione geometrica della curvatura Riemanniana», Rendiconti di Circolo Matematico di Palermo 42, 173-205.

Lewis, Gilbert, N. (1916), «The atom and the molecule», Journal of the American Chemical Society 28, 762-786.

—, (1923), Valence and the Structure of Atoms and Molecules, Nueva York, The Chemical Catalog Company.

Lichnerowicz, André (1939), Sur certains problems globaux relatifs au système des équations de Einstein, París, Hermann.

—, (1955), Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnetisme, París, Masson.

—, (1992), «Mathematics and General Relativity: a recollection», en Eisenstaedt

y Kox, eds. (1992: 103-108)

Lichnerowicz, André y Tonnelat, Marie-Antoinette, eds. (1962), Les Théories Relativistes de la Gravitation, ed., París, Centre National de la Recherche Scientifique.

Lichtenberg, Frank R. (1989), «The impact of the Strategic Defense Iniciative on US civilian R&D investment and industrial competitiveness», Social Studies of Science 19, 265-282.

Lichtenberg, D. B. y Rosen, S. P. eds. (1980), Developments in the Quark Theory of Hadrons. A Reprint Collection, vol. 1 (1964-1978), Nonamtum, Mass., Hadronic Press.

Lifshitz, Evgeny y Khaltnikov, Isaak M. (1960 a), «On the singularities of cosmological solutions of the gravitational equations, I», Journal of Experimental and Theoretical Physics 29 (USSR), 149-157.

—, (1960 b), «On the singularities of cosmological solutions of the gravitational equations, II», Journal of Experimental and Theoretical Physics (USSR) 29, 800-808.

Lifshitz, Evgeny, Sudakov, V. V. y Khaltnikov, Isaak M. (1961), «On the singularities of cosmological solutions of the gravitational equations, III», Journal of Experimental and Theoretical Physics (USSR) 40, 1847--1855.

Lightman, Alan (1999), «Prólogo» en Guth (1999: 9-12).

—, (2005), The Discoveries, Nueva York, Pantheon Books.

Lightman, Alan y Brawer, Roberta (1990), Origins. The Lives and Worlds of Modern Cosmologists, Cambridge, Mass., Harvard University Press.

Lilley A. Edward (1957), «Radio astronomical measurements of interest to cosmology», en DeWitt, ed. (1957: 55-59).

Linde, Andrei D. (1982), «A new inflationary universe scenario: a possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problem», Physics Letters 108 D, 383-393.

Livingston, M. Stanley (1969), Particle Accelerators. A Brief History, Cambridge, Mass, Harvard University Press.

Logsdon, John M., ed. (1995), Exploring the Unknown. Selected Documents in the History of the U.S. Civil Space Program, Washington D. C., National Aeronautics and Space Administration. Nasa History Office.

London, Fritz (1938), «The λ-point phenomenon of liquid helium and the Bose-Einstein degeneracy», Nature 141, 643-644.

Longair, Malcolm S. (1995), «Astrophysics and cosmology», en Brown, Pais y Pippard (1995, vol. III: 1691-1821).

—, (2006), The Cosmic Century, Cambridge, Cambridge University Press.

Lorentz, Hendrik A. (1904), «Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light», Verslag Koninklijke Akademie van Wetenschappe (Amsterdam) 12, 986-1006.

Lorenz, Edward N. (1963), «Deterministic non-periodic flows», Journal of Atmospheric Science 20, 130-141.

—, (1995), La esencia del caos, Madrid, Debate (edición original en inglés de 1993).

Lovell, Bernard (1968), Story of Jodrell Bank, Oxford, Oxford University Press.

—, (1991), Echoes of War, Bristol, Adam Hilger.

Lovelock, James (2006), The Revenge of Gaia, Londres, Allen Lane.

Lüders, Gerhart (1954), «On the equivalence of invariance under time reversal and under particle-antiparticle conjugation for relativistic field theories», Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Matematisk-Fysiske Meddelelser 28, 1-17

Maeder, André (1994), «A selection of 10 most topical stellar problems», en Wamsteker, Longair y Kondo, eds. (1994: 177-186).

Maglich, Bogdan, ed. (1973), Adventures in Experimental Physics (Gamma

Volume), Princeton, World Science Education.

Maiman, Theodore H. (1960), «Stimulated optical radiation in ruby», Nature 187, 493-494.

Manuel, Frank E. (1968), A Portrait of Isaac Newton, Cambridge, Mass., The Belknap Press of Harvad University Press.

Marlow, A. R., ed. (1978), Mathematical Foundations of Quantum Theory, Nueva York, Academic Press.

Marro, Joaquín (2008), Física y vida, Barcelona, Crítica.

Matthews, Thomas A. y Sandage, Allan R. (1963), «Optical identification of 3c 48, 3c 196, and 3c 286 with stellar objects», Astrophysical Journal 128, 30-56.

Mather, John C. et al. (1990), «A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (Cobe) satellite», Astrophysical Journal 254, L-37-L40.

Maxwell, James Clerk (1861-1862), «On the physical lines of force», Philosophical Magazine 21, 161-175, 281-291, 338-345; 22, 12-24, 85-95. Reproducido en Niven, ed. (1965: vol. I, 451-513).

Mayor, Michel y Queloz, Didier (1995), «A Jupiter-mass companion to a solar-type star», Nature 278, 355-359.

McCrea, William (1963), «Cosmology, a brief review», Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society 4, 185-201.

McGrath, Elizabeth J, Goss, W. M. y de Pree, C. G. (2004), «H2O masers in W49N and Sagittarius B2», Astrophysical Journal. Supplement Series 155, 577-593.

McLean, I. S. (1997), Electronic Imaging in Astronomy: Detectors and Instrumentation, Chichester, Wiley-Praxis.

McMillan, Edwin M. (1945), «The synchrotron - A proposed high energy particle accelerator», Physical Review 68, 143-144.

McMillan, Edwin y Abelson, Philip (1940), «Radioactive Element 93», Physical Review 57, 1185-1186.

Mead, C. y Hager, T., eds. (2001), Linus Pauling, Scientist and Peacemaker, Corvallis, Oregon State University Press.

Mehra, Jagdish (1994), The Beat of a Different Drum. The Life and Science of Richard Feynman, Oxford, Clarendon Press.

Mehra, Jagdish y Milton, Kimball A. (2000), Climbing the Mountain. The Scientific Biography of Julian Schwinger, Oxford, Oxford University Press.

Mehra, Jagdish y Rechenberg, Helmut (2001), The Historical Development of Quantum Theory, vol. 6, Nueva York, Springer.

Mehra, Jagdish, ed. (1973), The Physicist's Conception of Nature, Dordrecht, Boston.

Mercier, André y Kervaire, Michel, eds. (1956), Fünfzig Jahre Relativitätstheorie/Cinquantenaire de la Théorie de la Relativité/ Jubilee of Relativity Theory, Basilea, Helvetica Physica Acta Supplementum IV/Birkhauser Verlag.

Michell, John (1767), «An inquiry in to the probable parallax, and magnitude of the fixed stars, from the quantity of light which they afford us, and the particular circumstances of their situation», Philosophical Transactions of the Royal Society 57, 234-264.

Michelson, Albert A. y Morley, Edward W. (1887), «On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether», The American Journal of Science 34, 333-345.

Miller, Arthur I. (1994), Early Quantum Electrodynamics. A Source Book, Cambridge, Cambridge University Press.

Minkowski, Hermann (1909), «Raum und zeit», Physikalische Zeitschrift 10, 104-111.

Minkowski, Rudolph (1960), «A new distant cluster of galaxies», Astrophysical Journal 122, 908-910.

Mitton, Simon (2005), Conflict in the Cosmos. Fred Hoyle's Life in Science, Washington D. C., Joseph Henry Press.

Mladjenovic, Milorad (1988), The Defining Years in Nuclear Physics, 1922-1960s, Bristol, Institute of Physics Publishing.

Monk, Ray (2012), Inside the Centre. The Life of J. Robert Oppenheimer, Londres, Jonathan Cape.

Montgomery, Colin, Orchiston, Wayne y Whittingham, Ian (2009), «Michell, Laplace and the origin of the black hole concept», Journal of Astronomical History and Heritage 12, 90-96.

Moore, Walter (1989), Schrödinger. Life and Thought, Cambridge, Cambridge University Press.

Morley, Lawrence W. Morley (2003), «The Zebra pattern», en Oreskes, ed. (2003: 67-85).

Mott, Nevill (1988), «Development of solid state physics in England and Germany», en Giuliani, ed. (1988: 243-248).

Müller, K. Alexander y Bednorz, J. Georg (1987), «The discovery of a class of high-temperature superconductivity», Science 227, 1133-1139.

Muller, Hermann. M. (1927), «Artificial transmutation of the gene,» Science 66, 84-87.

Munns, David P. D. (2003), «If we build it, who will come? Radio astronomy and the limitations of "national" laboratories in Cold War America», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 24, 95-113.

—, (2013), A Single Sky. How the International Community Forged the Science of Radio Astronomy, Cambridge, Mass., The Mit Press.

Myers, Robert A. y Dixon, Richard W. (2003), «Who invented the laser: an analysis of the early patents», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 24, 115-149.

Nakano, Tadao y Nishina, Kazuhiko (1953), «Charge independence for V-

particles», Progress of Theoretical Physics 10, 581-582.

Nambu, Yoichiro (1985), Quarks. Frontiers in Elementary Physics, Singapur, World Scientific.

Neddermeyer, Seth H. y Anderson, Carl D. (1937), «Note on the nature of cosmic-ray particles», Physical Review 51, 884-886.

Ne'eman, Yuvai (1961), «Derivation of strong interactions from a gauge invariance», Nuclear Physics 26, 222-229.

Nernst, Walter (1914), The Theory of the Solid State, Londres, University of London Press.

NG, Y. Jack, ed. (1996), Julian Schwinger. The Physicist, the Teacher, and the Man, Singapur, World Scientific.

Niven, W. D., ed. (1890), The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, Cambridge, Cambridge University Press.

Nobel Lectures 1963-1970 (1972), Nobel Lectures Including Presentations Speeches and Laureates' Biographies. Physics 1962-1970, Amsterdam, Elsevier.

Noether, Emmy (1918 a), «Invarianten beliebiger Differentialausdrücke», Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 37-44.

—, (1918 b), «Invariante Variationsprobleme», Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 235-257.

Noyce, Robert N. (1987), «Microelectrónica», Investigación y Ciencia (noviembre 7-14).

Ohm, E. A. (1961), «Project Echo. Receiving system», The Bell System Technical Journal 40, 1065-1099.

Olby, Robert (1991), El camino hacia la doble hélice, Madrid, Alianza Editorial (edición original en inglés de 1974).

Olwell, Russell (1999), «Physical isolation and marginalization in physics», Isis 90,738-756.

Oppenheimer, J. Robert (1929), «Über die strahlung der freien elektronen in Coulombfeld», Zeitschrift für Physics 55, 725-737.

—, (1930), «Note on the theory of interaction of field and matter», Physical Review 25, 461-477.

—, (1948), «Physics in the contemporary world», Bulletin of Atomic Scientists 4, 66 (marzo), 65-68, 85-86.

Oppenheimer, J. Robert y Serber, Robert (1937), «Note on the nature of cosmic-ray particles», Physical Review 51, 113.

—, (1938), «On the stability of stellar neutron cores», Physical Review 54, 540.

Oppenheimer, J. Robert y Snyder, Hartland (1939), «On continued gravitational contraction», Physical Review 56, 455-459.

Oppenheimer, J. Robert y Volkoff, George (1939), «On massive neutron cores», Physical Review 55, 374-381.

O'Raifeartaigh, Lochlainn (1997), The Dawning of Gauge Theory, Princeton, Princeton University Press.

Oreskes, Naomi, ed. (2003), Plate Tectonics. An insider's history of the modern theory of the Earth, Boulder, Westview Press.

Ortega y Gasset, José (1923), El tema de nuestro tiempo, Madrid, Calpe. Reproducido en Ortega y Gasset (2005: 557-652).

—, (2005), Obras completas, tomo III («1917/1925»), Madrid, Fundación José Ortega y Gasset/Taurus.

Orton, John (2004), The Story of Semiconductors, Oxford, Oxford University Press.

Osterbrock, Donald (1984), James E. Keeler: Pioneer American Astrophysicist, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (2001), Walter Baade: A Life in Astrophysics, Princeton, Princeton University Press.

Ostriker, Jeremiah P. (1982), «Galaxy formation», en Brück, Coyne y Longair, eds. (1982: 473-487).

Ostriker, Jeremiah P. y Mitton, Simon (2014), El corazón de las tinieblas. Materia y energía oscuras: los misterios del Universo invisible, Barcelona, Pasado & Presente (edición original en inglés de 2013).

Ostriker, Jeremiah P. y Peebles, P. James E. (1973), «A numerical study of the stability of flattened galaxies: or, can cold galaxies survive?», Astrophysical Journal 186, 467-480.

Pacini, Franco (1967), «Energy Emission from a Neutron Star», Nature 216, 567-568.

Paine, Thomas (1994), Rights of Man, Nueva York, Alfred A. Knopf.

Pais, Abraham (1986), Inward Bound, Oxford, Clarendon Press.

Panofsky, Wolfgang K. H. (1992), «SLAC and Big Science: Stanford University», en Galison y Hevly, eds. (1992: 129-146).

—, (2007), Panofsky on Physics, Politics and Peace. Pief Remembers, Nueva York, Springer.

Pauli, Wolfgang (1921), «Relativitätstheorie», en Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften, vol. 5, parte 2, Leipzig, B. G. Teubner, 539-775.

—, (1955), «Exclusion principle, Lorentz group, and reflection in space-time and charge», en Pauli, Rosenfeld y Weisskopf, eds. (1955: 30-51).

Pauli, Wolfgang y Fierz, Markus (1939), «Über relativistische feldgleichungen von teilchen mit beliebigen spin im elektromagnetischen feld», Helvetica Physica Acta 12, 297-304.

Pauli, Wolfgang, Rosenfeld, Léon y Weisskopf, Victor, eds. (1955), Niels Bohr and the Development of Physics, Nueva York, Academic Press.

Pauling, Linus (1939), The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals, Ithaca, Cornell University Press.

—, (1940), The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals, 2ª. edición, Ithaca, Cornell University Press.

—, (1981), «Early work on chemical bonding in relation to solid state physics», Proceedings Royal Society of London A 278, 207-218.

—, (2001), «The original manuscript for The Nature of the Chemical Bond», en Mead y Hager, eds. (2001: 109-110).

Peierls, Rudolf E. (1929), «Zur Theorie des Hall-effekts», Physikalische Zeitschrift, 20, 273-274.

—, (1932), «Elektronentheorie der Metalle», Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften 11, 264-322.

—, (1955), Quantum Theory of Solids, Oxford, Clarendon Press.

Penrose, Roger (1965), «Gravitational collapse and space-time singularities», Physical Review Letters 14, 57-59.

—, (1966), An Analysis of the Structure of Space-Time (publicación mimeográfica); reproducido en Penrose (2011: cap. 28).

—, (1968), «Structure of Space-Time», en DeWitt y Wheeler, eds. (1968:121-235).

—, (1969), «Gravitational collapse: the role of general relativity», Revista del Nuovo Cimento 1, 252-276. Traducción al español en Hawking y Penrose (1993: 52-86).

—, (1972), Techniques of Differential Topology in Relativity, Filadelfia, Siam.

—, (2000), «Mathematical physics of the 20th and 21st centuries», en Arnold, Atiyah, Lax y Mazur, eds. (2000: 219-234).

—, (2011), Collected Papers, Oxford, Oxford University Press.

Penzias, Arno A. y Wilson, Robert W. (1965), «A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s», Astrophysical Journal 142, 419-421.

Perl M. L. et al. (1975), «Evidence for anomalous lepton production in e+e- annihilation», Physical Review Letters 25, 1489-1492.

Perlmutter, Saul (2003), «Supernovae, dark energy, and the accelerating Universe», Physics Today (abril), 53-57.

Perlmutter, Saul et al. (1998), «Discovery of a supernova explosion at half the age of the universe and its cosmological implications», Nature 291, 51-54.

Perrier, Carl y Segrè, Emilio (1937), «Some chemical properties of element 43», Journal of Chemical Physics 5, 712-716.

Perutz, Max F. (180), «Origins of molecular biology,» New Scientist 85, 326-329.

Physique des Particules (1982), Colloque International sur l'Histoire de la Physique des Particules, Suplemento C8-1982 al Journal de Physique, fascículo 12.

Pimbley, Joseph M. (1997), «Physicists in finance», Physics Today 50, 42-46.

Planck, Max (1900), «Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum», Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2, 237-243.

Planck Collaboration (2013), «Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results», Astronomy & Astrophysics manuscript no. PlanckMission 2012 (22 de marzo).

Poincaré, Henri (1964), El valor de la ciencia, Madrid, Espasa-Calpe (edición original en francés de 1905).

Poisson, Siméon-Denis (1809), «Sur la variation des constantes arbitraires dans les questions de Mécanique», Journal de l'École Polytechnique 8, 266-353.

Politzer, H. David (1973), «Reliable perturbative results for strong interactions?», Physical Review Letters 20, 1346-1349.

Pontecorvo, Bruno (1957), «Mesonium and antimesonium», Journal Experimental and Theoretical Physics (URSS) 22, 549-551.

Popper, Karl R. (1959), The Logic of Scientific Discovery, Londres, Hutchinson.

—, (1976), «Autobiography», en Schilpp, ed. (1976: 1-181),

Preskill, John (1979), «Cosmological production of superheavy magnetic monopoles», Physical Review Letters 42, 1365-1368.

Preskill, John y Thorne, Kip S. (1995), «Foreword», en Feynman (1995 b: vii-xxx).

Raleigh, Walter (1614), The Historie of the World, Londres, impreso por William Stansby para Walter Burre.

—, (1829), History of the World, Works, Oxford, Oxford University Press.

Ramo, Simon (1962), «The impact of missiles and space on electronics», Proceedings of the IRE 50, 1237-1241.

Reber, Grote (1984), «Early radio astronomy at Wheaton, Illinois», en Sullivan III, ed. (1984 b: 43-66).

Reber, Grote y Greenstein, Jesse L. (1947), «Radio frequency investigations of astronomical interest», Observatory 67, 15-26.

Redei, Miklós y Stöltzner, Michael, eds. (2001), John von Neumann and the Foundations of Quantum Physics, Dordrecht, Kluwer.

Reichenbach, Hans, «Autobiographical sketches for academic purposes», en Reichenbach, M. y Cohen, eds. (1978, vol. I: 1-86).

Reichenbach, Maria y Cohen, Robert S. eds. (1978), Hans Reichenbach, Selected Writings, 1909-1952, Dordrecht, Reidel.

Reid, Thomas R. (2001), The Chip, Nueva York, Random House.

Reines, Frederick (1982), «Neutrinos to 1960 - Personal recollections», en Physique des Particules (1982: 237-260).

—, (1989), «Detection of the neutrino», en Brown, Dresden y Hoddeson, eds. (1989: 359-366).

Reines, Frederick, ed. (1972), Cosmology, Fusion & Other Matters. George Gamow Memorial Volume, Londres, Adam Hilger.

Reines, F. y Cowan, jr. C. L. (1953 a), «A proposed experiment to detect free neutrino», Physical Review 90, 492.

—, (1953 b), «On the detection of the free neutrino», Technical Report, Los Alamos Scientific Laboratory.

—, (1953 c), «Detection of the free neutrino», Physical Review 92, 830-831 (L).

Renn, Jürgen y Sauer, Tilman (2000), Eclipses of the Stars - Mandl, Einstein, and the Early History of Gravitational Lensing, Max-Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint n.º 160.

—, (2003), «Eclipses of the stars», en Ashtekar, Cohen, Howard, Renn, Sarkar y Shimony, eds. (2003: 69-92).

Renn, Jürgen, Sauer, Tilman y Stachel, John (1997), «The origin of gravitational lensing: A postcript to Einstein's 1936 Science paper», Science 275, 184-186.

Rhodes, Richard (1993), Nuclear Renewal, Nueva York, Whittle Books.

Ricci, Gregorio y Levi-Civita, Tullio (1901), «Méthodes de calcul différentiel absolu et leurs applications», Mathematische Annalen 54, 125-201.

Richardson, Robert S. (1940), «Luna Observatory No. 1», Astounding Science Fiction (febrero), 113-123.

Ridgen, John S. (1987), Rabi, Scientist and Citizen, Nueva York, Basic Books.

Riess, Adam G. et al. (1998), «Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant», Astronomical Journal 116, 1009-38.

Riordan, Michael y Hoddeson, Lillian (1997), Crystal Fire. The Birth of the Information Age, Nueva York, W. W. Norton.

Riordan, Michael, Hoddeson, Lillian y Herring, Conyers (1999), «The invention of the transistor», Reviews of Modern Physics 71, S336-S345.

Robb, Alfred A. (1911), Optical Geometry on Motion, a New View of the Theory of Relativity, Cambridge, W. Heffer.

—, (1914), A Theory of Time and Space, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1921), The Absolute Relations of Time and Space, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1936), Geometry of Time and Space, Cambridge, Cambridge University Press.

Robertson, Howard P. (1929), «On the foundations of relativistic cosmology», Proceedings of the National Academy of Sciences 15, 822-829.

—, (1935), «Kinematics and world structure», Astrophysical Journal 82, 284-301.

Robinson, I., Schild, A. y Schucking, E.L., eds. (1965), Quasi-stellar Sources and Gravitational Collapse, Chicago, University of Chicago Press.

Romero de Pablos, Ana y Sánchez Ron, José M. (2001), Energía nuclear en España. De la Jen al Ciemat, Madrid, Ministerio de Ciencia y Tecnología/Ciemat.

Rossi, Bruno (1964), Cosmic Rays, Londres, George Allen and Unwin.

Rowe, David (1999), «The Göttingen response to general relativity and Emmy Noether's theorems», en Gray, ed. (1999: 189-233).

Ruska, Ernst (1929), Über eine Berechnungsmethode des Kathodenstrahloszillographen auf Grund der experimentell gefundenen Abhängigkeit des Schreibfleckdurchmessers von der Stellung der Konzentrierspule, Technische Hochschule Berlin.

—, (1930), Untersuchung elektrostatischer Sammelvorrichtungen als Ersatz der magnetischen Konzentrierspulen beim Kathodenstrahloszillographen,

Technische Hochschule Berlin.

Ruska, Ernst y Knoll, Max (1931), «Die magnetishe Sammelspule für schnelle Elektronenstrahlen», Zeitschrift für Technische Physik 12, 389-400, 448.

Russell, Bertrand (1919), «Einstein's theory of relativity», The Athenaeum, n. ° 4.672 (14 de noviembre). Reproducido en Russell (1988: 207-209)

—, (1926), «Philosophical consequences of relativity», The Encyclopedia Britannica, pp. 331-332. Reproducido en Russell (1988: 228-234).

—, (1988), Essays on Language, Mind and Matter, 1919-26, John G. Slater, ed., Londres, Unwin Hyman, vol. 9 de The Collected Papers of Bertrand Russell, pp. 125-133; p. 132.

Rutherford, Ernest (1911), «The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom», Philosophical Magazine 21, 669-688.

—, (1919), «Collision of α particles with light atoms. III. Nitrogen and oxygen atoms», Philosophical Magazine 27, 571-580.

Ryder, R. N. (1987), en Lerner y Trigg, eds. (1987: 1572-1579).

Ryle, Martin (1955), «Radio stars and their cosmological significance», The Observatory 75, 137-147.

Ryle, M. y Scheuer, P. A. G. (1955), «The spatial distribution and the nature of radio stars», Proceedings of the Royal Society A220, 448-462.

Ryle, M., Shakeshaft, J. R., Baldwin, J. E., Elsmore, B. et al. (1955), «A survey of radio sources between declinations –38° and +83°», Memoirs of the Royal Astronomical Society 67, 106-154

Ryle, M., Smith, F. G. y Elsmore, B. (1950), «A preliminary survey of the radio stars in the Northern hemisphere», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 110, 508-523.

Sajarov, Andrei (1991), Memorias, Barcelona, Plaza & Janés (edición original en inglés de 1990).

Sakata, Shoichi (1956), «On a composite model for the new particles», Progress of Theoretical Physics 16, 686-688.

Salam, Abdus (1968), «Weak and electromagnetic interactions», en Svartholm, ed. (1968).

Salam, Abdus, Heisenberg, Werner y Dirac, Paul A. M. (1991), La unificación de las fuerzas elementales, Barcelona, Gedisa (edición original en inglés de 1990).

Salam, Abdus y Wigner, Eugene P. (1972), «Preface», en Salam y Wigner, eds. (1972: ix).

Salam, Abdus y Wigner, Eugene P., eds. (1972), Aspects of Quantum Theory, Cambridge, Cambridge University Press.

Sánchez Ron, José M. (1985), El origen y desarrollo de la relatividad, Madrid, Alianza Editorial.

—, (1990), «Steady-state cosmology, the arrow of time, and Hoyle and Narlikar's theories», en Bertotti, Balbinot, Bergia y Messina, eds. (1990: 233-243).

—, (1991), «John von Neumann y los Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica, en Von Neumann (1991: xi-lix).

—, (1992), «Erwin Schrödinger, teorías unificadas y la estructura geométrica del espacio-tiempo», en Schrödinger (1992: 11-29).

—, (1993), «Introducción» en Hawking y Penrose (1993: 9-33).

—, (2000), Marie Curie y su tiempo, Barcelona, Crítica.

—, (2001), Historia de la física cuántica, I: El periodo fundacional (1860-1926), Barcelona, Crítica.

—, (2003), El triángulo mágico: Física, matemáticas y filosofía a propósito de Albert Einstein, Madrid, Universidad Autónoma de Madrid; lección de apertura de curso en la Universidad Autónoma de Madrid (30 de septiembre).

—, (2004), «Einstein, la relatividad y las matemáticas», La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española 7, n.° 1, 153-184.

—, (2007 a), El poder de la ciencia, Barcelona, Crítica.

—, (2007 b), «Einstein y la filosofía del siglo XX», Arbor 182, n.° 728 (noviembre-diciembre), 833-853.

—, (2008), «El mundo después de la revolución: la física en la segunda mitad del siglo XX», en Fronteras del conocimiento, Madrid, BBVA, pp. 63-91.

—, (2011), Ciencia, política y poder. Napoleón, Hitler, Stalin y Eisenhower, Madrid, Fundación BBVA.

—, (2012), «The early reception of Einstein's relativity among British philosophers», en Lehner, Renn y Schemmel, eds. (2012: 75-118).

Sandage, Allan (1958), «Current problems in the extragalactic distance scale», Astrophysical Journal 127, 513-526.

—, (2004), Centennial History of the Carnegie Institution, vol. I (The Mount Wilson Observatory), Cambridge, Cambridge University Press.

Schawlow, Arthur y Townes, Charles H. (1958), «Infrared and optical masers», Physical Review 112, 324-327.

—, (1960), «A medium in which a condition of population inversion exists», U.S. Patent 2.929.922, 22 de marzo.

Scheiner, Eric D. y Sagan, Doris (2008), La termodinámica de la vida, Barcelona, Tusquets (edición original en inglés de 2005).

Scheiner, Julius (1899), «On the spectrum of the Great Nebula in Andromeda», Astrophysical Journal 9, 149-150.

Schewe, Phillip F. (2013), Maverick Genius. The Pioneering Odyssey of Freeman Dyson, Nueva York, Thomas Dunne Books.

Schlesinger, jr., Arthur (1971), «The history as participant», Daedalus 100 (primavera) 339-358.

Schlick, Moritz (1915), «Die philosophische Bedeutung des Relatitätsprinzips», Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik 159, 129-175.

—, (1917), Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik. Zur Einführung in das Verständnis der allgemeinen Relativitätstheorie, Die Naturwissenschaften 5, 161-167, 177-186.

Schilpp, Paul A., ed. (1949), Albert Einstein: Philosopher-Scientist, La Salle, Illinois, Open Court.

—, (1963), The Philosophy of Rudolf Carnap, La Salle, Illinois, Open Court.

—, (1976), The Philosophy of Karl Popper, La Salle, Illinois, The Open Court.

Schmidt, Brian et al. (1998), «High-Z supernova search: Measuring cosmic deceleration and global curvature of the universe using type Ia supernova», Astrophysical Journal 507, 46-63.

Schmidt, Maarten (1963), «3C 273: a star-like object with large red-shift», Nature 197, 1040.

Schmidt, M. y Matthews, T. A. (1964), «Redshift of the quasi-stellar radio sources 3C 47 and 3C 147», Astrophysical Journal 139, 781-785.

Schouten, Jan (1918), «Die direkte Analysis zur neueren Relativitätstheorie», Verhandelingen Koninklijke Akademie van Wetenchappen te Ámsterdam 12, 3-98.

—, (1924), Der Ricci-Kalkul, Berlín, Julius Springer.

Schrödinger, Erwin (1926 a), «Zur Einsteinschen Gastheorie», Physikalische Zeitschrift 27, 95-101.

—, (1926 b), «Quantisierung als Eigenwertproblem. (Erste Mitteilung)», Annalen der Physik 79, 361-376.

—, (1926 c), «Quantisierung als Eigenwertproblem. (Zweite Mitteilung)», Annalen der Physik 79, 489-527.

—, (1935), «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», Die

Naturwissenschaften 22, 807-812, 823-828, 844-849.

—, (1943), «The general unitary theory of the physical fields», Proceedings of the Royal Irish Academy 49 A, 43-58.

—, (1944 a), «The point charge in the unitary field theory», Proceedings of the Royal Irish Academy 49 A, 225-235.

—, (1944 b), «The union of the three fundamental fields (gravitation, meson, electromagnetism», Proceedings of the Royal Irish Academy 49 A, 275-287.

—, (1983), ¿Qué es la vida?, Barcelona, Tusquets Editores (edición original en inglés de 1944).

—, (1992), La estructura del espacio-tiempo, Madrid, Alianza Editorial (edición original en inglés de 1950).

Schulmann, Robert, Kox, A. J., Janssen, Michel e Illy, Jozsef, eds. (1998), The Collected Papers of Albert Einstein, vol. 8, parte B, Princeton, Princeton University Press.

Schuster, Arthur (1911), The Progress of Physics During 22 Years (1875-1908), Cambridge, Cambridge University Press.

Schwartz, Laurent (1945), «Généralisation de la notion de function de dérivation, de transformation de Fourier et applications mathématiques et physiques», Annales de l'Université de Grenoble 21, 57-74.

—, (1950-1951), Théorie des distributions, 2 vols., París, Hermann.

Schwarzschild, Karl (1916), «Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie», Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsbericht, 189-196.

Schweber, Silvan S. (1990), «The young John Clarke Slater and the development of quantum chemistry», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 20, 339-406.

—, (1994 a), QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga, Princeton, Princeton University Press.

—, (1994 b), «Some reflections on big science and high energy physics in the United States», Rivista di Storia della Scienza 2, 127-189.

—, (2012), Nuclear Forces. The Making of the Physicist Hans Bethe, Cambridge, Mass, Harvard University Press.

—, (1997), «A historical perspective on the rise of the standard model», en Hoddeson, Brown, Riordan y Dresden, eds. (1997: 645-684).

Schwinger, Julian S. (1948 a), «On quantum-electrodynamics and the magnetic moment of the electron», Physical Review 72, 416-417.

—, (1948 b), «Quantum electrodynamics, I. A covariant formulation», Physical Review 74, 1439-1461.

—, (1949 a), «Quantum electrodynamics, II. Vacuum polarization and self-energy», Physical Review 75, 651-679.

—, (1949 b), «On radiative corrections to electron scattering», Physical Review 75, 898-899.

—, (1949 c), «Quantum electrodynamics, III. The electromagnetic properties of the electron - radioactive corrections to scattering», Physical Review 76, 790-827.

—, (1957), «A theory of the fundamental interactions», Annals of Physics 2, 407-434.

Schwinger, Julian S., ed. (1958), Selected Papers on Quantum Electrodynamics, Nueva York, Dover.

Segrè, Emilio (1993), A Mind Always in Motion. The Autobiography of Emilio Segrè, Berkeley, University of California Press.

Shapley, Harlow, ed. (1960), Source Book in Astronomy, 1900-1950, Cambridge, Mass., Harvard University Press.

Seidel, Robert W. (1987), «From glow to flow: A history of military laser and development», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 18, 111-147.

Shockley, William (1947), «Density of surface states on silicon deduced from contact potential measurements», Physical Review 72, 345.

—, (1948), «Modulation of conductance of thin films of semiconductors by surface changes», Physical Review 74, 232-233.

—, (1949), «The theory of P-N junctions in semiconductors and P-N junction transistors», Bell System Technical Journal 28, 435-489.

—, (1950), Electrons and Holes in Semiconductors, with Applications to Semiconductors, Nueva York, Van Nostrand.

—, (1976), «The transistor», «The path to the conception of the junction», IEEE Transactions Electron Devices ED-22, 597-620.

Shockley, William B. y Pearson, Gerald L. (1948), «Modulation of conductance of thin films of semi-conductors by surface changes», Physical Review 74, 232-233.

Shockley, William, Sparks, Morgan y Teal, Gordon (1951), «P-N junction transistors», Physical Review 82, 151-162.

Slater, John C. (1975), Solid-State and Molecular Theory. A Scientific Biography, Nueva York John Wiley.

Slipher, Vesto M. (1913), «The radial velocity of the Andromeda nebula», Lowell Observatory Bulletin 2, n.º 58, 56-57.

—, (1915), «Spectrographic observations of nebulae (Reports of the Seventeenth Meeting of the American Astronomical Society)», Popular Astronomy 22, 21-24.

Smith, Peter (2001), El caos, Madrid, Cambridge University Press (edición original en inglés de 1998).

Smith, Robert W. (1989), The Space Telescope. A Study of NASA, Science, Technology and Politics, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1992), «The biggest kind of Big Science: astronomers and the Space Telescope», en Galison y Hevly, eds. (1992: 184-211).

Smith, Alice Kimball y Weiner, Charles, eds. (1980), Robert Oppenheimer. Letters and Recollections, Cambridge, Mass., Harvard University Press.

Smolin, Lee (2007), Las dudas de la física en el siglo XXI, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 2006).

Smoot, George et al. (1992), «Structure of the COBE differential microwave radiometer first year maps», Astrophysical Journal 296, L1-L5.

Smoot, George y Davison, Keay (1994), Arrugas en el tiempo, Barcelona, Círculo de Lectores (edición original en inglés de 1993).

Sommerfeld, Arnold y Bethe, Hans (1933), «Elektronentheorie der Metalle», Handbuch der Physik, Berlín, Springer.

Steinberger, Jack (1949), «On the use of subtraction fields and the lifetimes of some types of meson decay», Physical Review 76, 1180-1186.

—, (2005), Learning About Particles. 50 Privileged Years, Berlín, Springer.

Stent, Gunther S. (1996), «Introduction: waiting for the paradox», en Phage and the Origins of Molecular Biology, Cold Spring Harbor, Cold Spring Harbor Laboratories Press, pp. 3-8. Esta es una edición ampliada de la edición original, que apareció en 1992.

Struve, Otto y Zebergs, Velta (1962), Astronomy of the 20th Century, Nueva York, McMillan.

Sudarshan, E. C. George y Marshak, Robert E. (1957), «The nature of the four-fermion interaction», Padua Conference on Mesons and Recently Discovered Particles. Padua, V14-24.

—, (1958), «Chirality invariance and the universal Fermi interaction». Physical Review 109, 1860-1862.

Suits, C. G. y Way, H. E., eds. (1961), The Collected Works of Irving Langmuir, vol. 8 («Structure of Matter»), Oxford, Pergamon Press.

—, (1962), The Collected Works of Irving Langmuir, vol. 12 («Langmuir, the man and the scientist»), Oxford, Pergamon Press.

Sullivan III, Woodruff T. (1984 a), «Karl Jansky and the discovery of extraterrestrial radio waves», en Sullivan III, ed. (1984b: 3-42).

—, (2000), «Kapteyn's influence on the style and content of twentieth century Ducht astronomy», en Van der Kruit y Van Berkel, eds. (2000: 229-264).

Sullivan III, Woodruff T., ed. (1984 b), The Early Years of Radio Astronomy, Cambridge, Cambridge University Press.

Sunyaev, R. A., ed. (2004), Zeldovich. Reminiscences, Boca Raton, Chapman & Hall/Crc.

Suppe, Frederick, ed. (1977), The Structure of Scientific Theories, Urbana, University of Illinois Press.

Susskind, Leonard (2009), La Guerra de los agujeros negros, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 2008).

Svartholm, N., ed. (1968), Elementary Particle Theory: Relativistic Groups and Analyticity, Estocolmo, Almqvist and Wilksell.

Sylvester, James J. (1850), «Additions to the articles, "On a New Class of Theorems", and "On Pascal's Theorem"», Philosophical Magazine 27, 363-370.

Taylor, J. H., Fowler, L. A. y Mcculloch, P. M. (1979), «Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR1913+16», Nature 277, 437-440.

Thomson, Joseph J. (1923), The Electron in Chemistry, Filadelfia, The Franklin Institute Press.

Thomson, Laird A. (2013), «V. M. Slipher and the development of the nebular spectrograph», en Way y Hunter, eds. (2013: 1-7).

't Hooft, Gerardus (1971 a), «Renormalization of massless Yang-Mills fields», Nuclear Physics B 22, 173-177.

—, (1971 b), «Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields», Nuclear Physics B 25, 167-188

‘t Hooft, Gerardus y Veltman, Martinus (1972), «Regularization and renormalization of gauge fields», Nuclear Physics B 44 189-219.

Thorne, Kip S. (1995), Agujeros negros y tiempo curvo, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 1994).

Timoféeff-Ressovsky, Nikolai W., Zimmer, Karl G. y Delbrück, Max (1935), «Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur», Nachrichten von der Gesellschaft für Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Fachgruupe VI, 189-245.

Tisza, Laszlo (1938), «Transport phenomena in helium II», Nature 141, 913.

Tocqueville, Alexis de (1959), The European Revolution, John Lukas, ed, Garden City, Nueva York, Doubleday.

Tomonaga, Sin-Itiro (1946), «On a relativistically invariant formulation of the quantum theory of wave fields, I», Progress in Theoretical Physics 1, 1-13.

—, (1948), «On infinite field reactions in quantum field theory», Physical Review 74, 224.

—, (1997), The Story of Spin, Chicago, The University of Chicago Press.

Tonnelat, Marie-Antoinette (1965), Les théories unitaires de l’électromagnétisme et de la gravitation, París, Gauthier-Villars.

Townes, Charles H. (1995), Making Waves, Nueva York, The American Institute of Physics.

—, (1999), How the Laser Happened, Nueva York, Oxford University Press.

Townsend, Paul (2003), «The story of M», en Gibbons, Shellard y Rankin, eds. (2003: 484-493).

Trimble, Virginia L. y Thorne, Kip S. (1969), «Spectroscopic binaries and collapsed stars», Astrophysical Journal 156, 1013-1019.

Tropp, E. A., Frenkel, V. Ya. y Cherning, A. D. (1993), Alexander A. Friedmann: the Man who Made the Universe Expand, Cambridge, Cambridge

University Press.

Trower, W. Peter, ed. (1987), Discovering Alvarez. Selected Works of Luis W. Alvarez with Commentary by His Students and Colleagues, Chicago, The Chicago University Press.

Tryon, Edward P. (1973), «Is the universe a vacuum fluctuation?», Nature 246, 396-397.

Turchetti, Simone (2012), The Pontecorvo Affair. A Cold War Defection and Nuclear Physics, Chicago, The University of Chicago Press.

Tyson, J. Anthony (2003), «Grote Reber», Physics Today (agosto), 63-64.

Uhlenbeck, George y Goudsmit, Samuel (1925), «Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons», Die Naturwissenschaften 12, 953-954.

Urey, Harold C. Brickwedde, F. G. y Murphy, G. M. (1932), «A hydrogen isotope of mass 2 and its concentration», Physical Review 40, 1-15.

Van de Hulst, Henk (1945), «Radiostraling uit het wereldruim. II. Herkoms der radiogolven», Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde 11, 210-221.

Van der Kruit, P. C. y Van Berkel, eds. (2000), The Legacy of J. C. Kapteyn, Dordrecht, Kluwer.

Van der Waerden, Bartel L. (1932), Die Gruppentheoretische Methode in der Quantenmechanik, Berlín, Springer.

Van Woerden, Hugo y Strom, Richard G. (2006), «The beginnings of radio astronomy in The Netherlands», Journal of Astronomical History and Heritage 9, 3-20.

Veksler, Vladimir I. (1945), «A New Method of the Acceleration of Relativistic Particles», Journal of Physics USSR 9, 153-158 (publicado en ruso en 1944 en Doklady Akad. Nauk USSR 42, 346).

Vizgin, Vladimir (1994), Unified Field Theories in the First Third of the 20th Century, Basilea, Birkhäuser.

Vine, Frederich J. y Matthews, Drummond H. (1963), «Magnetic anomalies over ocean ridges», Nature 199, 947-949.

Von Meyenn, Karl (1987), «Pauli's belief in exact symmetries», en Doncel, Hermann, Michel y Pais, eds. (1987: 329-358).

Von Meyenn, Karl, ed. (1999), Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a., vol. III, parte II («1953-1954»), Berlín, Springer.

—, (2005), Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a., vol. IV («A: 1957»), Berlín, Springer.

Von Neumann, John (1927), «Mathematische begründung der Quantenmechanik», Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math.-Phys. Kl. 1-57.

—, (1932), Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, Berlín, Springer.

—, (1991), Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Wagoner, Robert V., William A. Fowler y Fred Hoyle (1967), «On the synthesis of elements at very high temperatures», Astrophysical Journal 148, 3-49.

Walker, Arthur G. (1935), «On Riemannian spaces with spherical symmetry about a line, and the conditions for isotropy in general relativity», Quarterly Journal of the Mathematics Oxford 6, 81-93.

Walker, Gordon A. H. (2003), «Seeking other solar systems», en Garwin y Lincoln, eds. (2003: 315-321).

Waloschek, Pedro (1994), The Infancy of Particle Accelerators. Life and Works of Rolf Wideröe, Braunschweig, Vieweg.

Walsh, D., Carswell, R. F. y Weyman, R. J. (1979), «0957+561 {A}, {B}: twin quasistellar objects or gravitational lens?», Nature 279, 381.

Wamsteker, W., Longair, M. S. y Kondo, Y., eds. (1994), Frontiers of Space and Ground-Based Astronomy, Dordrecht, Kluwer.

Wang, Jessica (2012), «Physics, emotion, and the scientific-self: Merle Tuve's Cold War», Historical Studies in the Natural Sciences 42, 341-388.

Wang, Zuoyue (1995), «The politics of big science in the Cold War: PSAC and the founding of SLAC», Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 25, 329-356.

Watson, Andrew (2004), The Quantum Quark, Cambridge, Cambridge University Press.

Watson, James (1970), The Double Helix, Londres, Penguin (primera edición de 1968).

Watson, James y Crick, Francis (1953), «A structure for deoxyribose nucleic acid», Nature 171, 737-738.

Way, Michael J. y Hunter, Deidre, eds. (2013), Origins of the Expanding Universe: 1912-1922, Astronomical Society of the Pacific.

Weart, Spencer R. y Phillips, Melba, eds. (1985), History of Physics, Nueva York, American Institute of Physics.

Weatherall, James Owen (2013), The Physics of Wall Street, Boston, Houghton Mifflin Harcourt. Existe traducción al español: Cuando los físicos asaltaron los mercados (Barcelona, Ariel 2013).

Weber, Joseph (1953), «Amplification of microwave radiation by substances not in thermal equilibrium», Transactions IRE Professional Group on Electron Devices PGED-2 (junio), 1-4.

—, (1961), General Relativity and Gravitational Waves, Nueva York, Interscience Publishers.

Webster, B. Louise y Murdin, Paul (1972), «Cygnus X-1: a spectroscopic binary with a heavy companion?», Nature 225, 37-38.

Wegener, Alfred (2009), El origen de los continents y océanos, Barcelona, Crítica (edición original en alemán de 1915).

Weinberg, Alvin (1994), The First Nuclear Era, Nueva York, American Institute

of Physics.

Weinberg, Steven (1967), «A model of leptons», Physics Review Letters 19, 1264-1266.

—, (1972), Gravitation and Cosmology, Nueva York, John Wiley & Sons.

—, (1977 a), The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe, Nueva York, Basic Books.

—, (1977 b), «The search for unity: notes for a history of quantum field theory», Daedalus 106, 17-35.

—, (1989), «The cosmological constant problem», Review of Modern Physics 61, 1-23.

—, (1994), El sueño de una teoría final, Barcelona, Crítica (edición original en inglés de 1992).

—, (1996), Los tres primeros minutos del Universo. Madrid, Alianza Editorial.

Weiner, Charles, ed. (1977), History of Twentieth Century Physics (Rendiconti della Scuola Internazionale di Fisica «Enrico Fermi», Varenna 1972), Nueva York, Academic Press.

Weisskopf, Victor F. (1983), «Growing up with field theory: the development of quantum electrodynamics», en Brown y Hoddeson, eds. (1983: 56-81).

—, (1991), The Joy of Insight. Passions of a Physicist, Nueva York, Basic Books.

Weitzenböck, Roland (1928), «Differential-invarianten in der Einsteinschen Theorie der Fernparallelism», Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 466-474.

Weizsäcker, Carl Friedrich von (1938), «Über elementumwandlungen im inner der sterne, II», Physikalische Zeitschrift 29, 633-646.

Wenkel, Simone y Deichmann, Ute, eds. (2007), Max Delbrück and Cologne. An Early Chapter of German Molecular Biology, Singapur, World Scientific.

Weston-Smith, Meg (2013), Beating the Odds. The Life and Times of E. A. Milne, Londres, Imperial College Press.

Weyl, Hermann (1919), Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen uber allgemeine Relativitätstheorie, Berlín, Julius Springer.

—, (1931), Gruppentheorie und Quantenmechanik, segunda edición, Leipzig, S. Hirzel.

—, (1929 a), «Gravitation and the electron», Proceedings of the National Academy of Sciences 15, 323-334.

—, (1929 b), «Elektron und gravitation», Zeitschrift für Physik 56, 330-352.

—, (1929 c), «The spherical symmetry of atoms», The Rice Institute Pamphlet 16, 266-279.

—, (1932), The Theory of Groups and Quantum Mechanics, Nueva York, E. P. Dutton.

—, (1950), The Theory of Groups and Quantum Mechanics, Nueva York, Dover.

—, (1952), Space-Time-Matter, Dover, Nueva York (traducción al inglés de la cuarta edición alemana, 1922).

Wheeler, John A. (1937), «On the mathematical description of light nuclei by the method of resonating», Physical Review 52, 1107.

—, (1960), «Neutrinos, gravitation and geometry», Rendiconti della Scuola Internazionale di Fisica «Enrico Fermi», Bolonia, Zanichelli. Reproducido en Wheeler (1962: 1-130).

—, (1962), Geometrodynamics, Nueva York, Academic Press.

Wheeler, John A. y Feynman, Richard P. (1945), «Interaction with the absorber as the mechanism of radiation», Reviews of Modern Physics 17, 157-181.

—, (1949), «Classical electrodynamics in terms of direct interparticle action», Reviews of Modern Physics 21, 425-433.

Wheeler, John A. y Zurek, Wojciech Hubert, eds. (1983), Quantum Theory and Measurement, Princeton, Princeton University Press.

Wheeler, John Archibald y Ford, Kenneth (1998), Geons, Black Holes and Quantum Foam, Nueva York, Norton.

Whipple, Fred L. y Greenstein, Jesse L. (1937), «On the origin of interstellar radio disturbances», Publications of the National Academy of Sciences 22, 177-181.

White, Bebo (1998), «The World Wide Web and high-energy physics», Physics Today 51 (noviembre), 30-36.

Whitehead, Alfred N. (1919), An Enquiry Concerning the Principles of Natural Knowledge, Cambridge, Cambridge University Press

—, (1920), The Concept of Nature, Cambridge, Cambridge University Press.

—, (1922), The Principle of Relativity, Cambridge, Cambridge University Press.

Wideröe, Rolf (1928), «Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen», Archiv für Elektrotechnik 21, 387-406.

Wilson, Robert W. (1990), «Discovery of the cosmic microwave background», en Bertotti, Balbinot, Bergia y Messina, eds. (1990: 291-307).

Wigner, Eugene (1931), Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren, Braunschweig, Friedrich Vieweg & Sohn.

—, (1959), Groups Theory and Its Applications to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra, Nueva York, Academic Press.

—, (1964), «Symmetry and conservation laws», Proceedings of the National Academy of Sciences 51, reimpreso en Wigner (1967: 14-27).

—, (1967), Symmetries and Reflections, Bloomington, Indiana University Press.

—, (1992), The Recollections of Eugene Wigner, as told to Andrew Szanton, Nueva York, Plenum Press.

Wilson, Alan (1980), «Solid state physics 1925-1933: opportunities missed and opportunities seized», Proceedings Royal Society of London A 271, 39-48.

Wilson, J. Tuzo (1965), «A new class of faults and their bearing on continental drift», Nature 207, 343-347.

Whitaker, Andrew (2012), The New Quantum Age. From Bell's Theorem to Quantum Computation and Teleportation, Oxford, Oxford University Press.

Witten, Edward (1995), «String theory dynamics in various dimensions», Nuclear Physics B 442, 85-126.

—, (2003), «The past and future of string theory», en Gibbons, Shellard y Rankin, eds. (2003: 455-462).

Wolf, Max (1908), «A new "Cave-Nebula" in Cepheus», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 69, 117.

Wolszczan, Alex y Dale Frail (1992), «A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12», Nature 255, 145-147.

Wright, Aaron Sidney (2014), «The advantages of bringing infinity to a finite place: Penrose diagrams as objects of intuition», Historical Studies in the Natural Sciences 44, 99-139.

Wright, Helen, Warnow, Joan N. y Weiner, Charles, eds. (1972), The Legacy of George Ellery Hale, Cambridge, Mass., The Mit Press.

Wu, Chien-Shiung (1973), «One researcher's personal account», en Maglich, ed. (1973: 101-123).

Wu, Chien-Shiung, Ambler, E., Hayward R. W., Hoppes, D. D. y Hudson, R. P. (1957), «Experimental test of parity conservation in beta decay», Physical Review 105, 1413-1414 (L).

Wünsch, Daniela (2005), «Einstein, Kaluza, and the fifth dimension», en Kox y Eisenstaedt, eds. (2005: 277-302).

Yang, Chen Ning (1996), «Julian Schwinger», en NG, ed. (1996: 175-180).

—, (1980), Lectures on Frontiers in Physics, Seúl, Korean Physical Society y Korea Science and Engineering Foundation.

—, (1983), Selected Papers with Commentary, Nueva York, Freeman.

—, (1986), «Hermann Weyl's contributions to physics», en Chandrasekharan, ed. (1986: 7-21).

Yang, Chen N. y Mills, Robert L. (1954 a), «Isotopic spin conservation and a generalized gauge invariance», Physical Review 95, 631.

—, (1954 b), «Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance», Physical Review 96, 191-195.

Ynduráin, Francisco J. (2006), Electrones, neutrinos y quarks, Barcelona, Crítica.

Yoshimura, Motohiko (1978), «Unified gauge theories and the baryon number of the universe», Physical Review Letters 41, 281-284.

Yukawa, Hideki (1935), «On the interaction of elementary particles. I», Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan 17, 48-57.

—, (1937), «On a possible interpretation of the penetrating component of the cosmic ray», Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan 19, 712-713.

—, (1982), «Tabibito» (The Traveler), Singapur, World Scientific.

Zeilinger, Anton (1999), «Experiment and the foundations of quantum physics», Reviews of Modern Physics 71, S288-S297.

Zeldovich, Yakov y Guseynov, Oktay H. (1966), «Collapsed stars in binaries». Astrophysical Journal 144, 840-841.

Zweig, George (1964), «An SU (3) model for strong interaction symmetry and its breaking». CERN Report No. 8181/Th 401 (enero) y No. 8419/Th 412 (febrero); reproducido en Lichtenberg y Rosen, eds. (1980: 22-101).

—, (1980), «Origins of the quark model», Report CALT-68-805.

—, (2010), «Memories of Murray and the quark model», International Journal of Modern Physics A 25, 3863-3877.

Zwicky, Fritz (1933), «Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln», Helvetica Physica Acta 6, 110-118.

—, (1937), «On the masses of nebulae and of clusters of nebulae», Astrophysical Journal 86, 217-246.

A. Einstein, H.A. Lorentz y A. Eddington.

Max Planck y Niels Bohr.

Albert Einstein, científico de fama mundial. Portada en la revista Nuevo Mund

Club de matemáticas de Gotinga (1902). En el centro, apoyado en la mesa, est

Albert Einstein y Georges Lemaître (c. 1933).

P. Dirac y W. Heisenberg.

E. Schrödinger.

Freeman Dyson.

Richard Feynman explicando un punto durante la Conferencia de 1947 en Shel

Pulido de la lente de un metro para el telescopio refractor de Yerkes. Los técni

El telescopio refractor del Observatorio de Yerkes exhibido (sin lentes) en la E

Fred Hoyle, en una conferencia en Dallas (Texas), 1973.

Fritz Zwicky.

Grote Reber junto a un radiotelescopio de 7,5 metros del National Bureau of S

Bernard Lovell.

Martin Ryle.

Jocelyn Bell.

Hermann Weyl.

Paul Dirac y Richard Feynman conversando durante la Conferencia sobre Teor

John A. Wheeler.

Roger Penrose.

Stephen Hawking a los 60 años, en el Centre for Mathematical Sciences de Ca

E. Lifshitz y L. Landau.

Subrahmanyan Chandrasekhar.

George Gamow.

Alan Guth.

Enrico Fermi, en Roma (década de 1920).

Ernest Lawrence con uno de los imanes para sus ciclotrones.

Grupo de Ernest O. Lawrence (sentado en el centro) en el Radiation Laborator

Wolfgang Pauli.

Steven Weinberg.

Físicos de partículas japoneses. Sentados, de izquierda a derecha, G. Araku, H.

A. Penzias y R. Wilson delante de la antena con la que descubrieron el fondo d

Andrei Sajarov.

J. Robert Oppenheimer.

Ciencia y técnica. Instalación para la obtención de etileno líquido en el laborat

El primer transistor de contacto.

Piotr Kapitza, después de recibir la medalla Lemosov (Moscú, febrero de 1960

William Shockley, Walter Brattain y James Bardeen en los Laboratorios Bell (

Charles Townes, James P. Gordon y Tic Wang con un máser de amoniaco (c. 1

Los autores de la teoría de la extinción del Cretácico-Terciario, 1980. De izqui

Notas

[1]. Un buen ejemplo de las esperanzas que suscitó la revolución de 1917, y la, todavía existente, estela que terminó dejando, es lo que escribió el historiador británico Eric Hobsbawm (2003: 62) en su autobiografía: «El sueño de la Revolución de Octubre permanece todavía en algún rincón de mi interior, como si se tratara de uno de esos textos que han sido borrados y que siguen esperando, perdidos en el disco duro de un ordenador, que algún experto los recupere. Lo he abandonado, mejor dicho, lo he rechazado, pero no he conseguido borrarlo. Hoy en día me doy cuenta de que sigo tratando el recuerdo y la tradición de la URSS con una indulgencia y una ternura que no siento por la China comunista, pues pertenezco a una generación para la que la Revolución de Octubre representaba la esperanza del mundo, cosa que nunca significó China». La esperanza del mundo, decía.

[2]. Etimológicamente, revolución proviene del latín revolutionem, acusativo singular de revolutio, que en el latín clásico se utilizaba para «desenrollar un documento» (los rollos que había que desenrollar para leerlos), y que terminó significando «girar», «dar vueltas». Si consultamos el primer diccionario de la Real Academia Española, el denominado Diccionario de Autoridades, en el tomo V (1737) encontramos: «Revolución.- La acción y efecto de revolver o revolverse», mientras que para Revolver daba la siguiente definición: «Menear una cosa de un lado a otro, moverla alrededor o de arriba abajo [...] Vale también inquietar, enredar, mover sediciones, causar disturbios y desazones [...] Vale dar una cosa vuelta entera hasta llegar al punto de donde salió».

[3]. Como ha mostrado Owen Gingerich (2002, 2004), De revolutionibus no fue, en modo alguno, «un libro que nadie leyó»; todo lo contrario, fue ampliamente estudiado por la, pequeña sin duda, comunidad de astrónomos de la época.

[4]. Acaso también sea relevante recordar en este punto, aquellos versos de William Shakespeare en La tempestad (Acto II, escena 1): Where of what's past is prologue, what to come / in yours and my discharge («Lo pasado es prólogo / y lo que viene hemos de ejecutarlo nosotros»).

[5]. He estudiado el origen y desarrollo de las teorías especial y general de la relatividad en Sánchez Ron (1985).

[6]. Sobre Friedmann, véase Tropp, Frenkel y Chernin (1993).

[7]. En sus memorias, George Gamow, que fue alumno de Friedmann en un curso que dictó en Leningrado (su nombre entonces, actualmente San Petersburgo) sobre «Fundamentos matemáticos de la teoría de la relatividad», señaló que «Friedmann era básicamente un matemático» y que «estudió las publicaciones de Einstein desde un punto de vista puramente matemático» (Gamow 1970: 41, 44).

[8]. Para más información sobre estos puntos, en particular sobre Friedmann, véase Kragh (1996).

[9]. Ver, por ejemplo, Weinberg (1972: 412). A pesar de que en la página 408 de este libro (una referencia canónica para el estudio de la gravitación, astrofísica y cosmología) se dice que «la métrica de Robertson-Walker» fue «obtenida de las ecuaciones del campo de Einstein en primer lugar por Alexander Friedmann en 1922», Weinberg se refiere constantemente a la «métrica», «Universo», de «Robertson-Walker». Una descripción más equilibrada de las diferencias entre las soluciones Robertson y Walker, por un lado, y Friedmann y Lemaître (del que trataré enseguida), por otro, aparece en Longair (1995: 1724-1729).

[10]. Significativo de la importancia que se daba al artículo de Friedmann es que Robertson (1929) solo lo menciona en una nota a pie de página (la número 3) con el comentario de que «la solución no estática encontrada por Friedmann está contenida en (2) [la métrica general que Robertson consideraba] en el caso en el que la presión propia es nula».

[11]. Ver, sobre todo, Lemaître (1946).

[12]. El telescopio que utilizó Galileo en sus pioneras observaciones astronómicas de 1609-1610 era «refractor»; esto es, utilizaba lentes que desviaban la dirección de los rayos de luz. Uno de los problemas de estos telescopios era la «aberración cromática»: debido a que la luz blanca está compuesta de diferentes colores elementales (diferentes longitudes de onda) y que cada uno de estos sufre una desviación diferente al atravesar la lente, el lugar en que incidía la luz, después de pasar por el cristal, no era un punto sino una zona más extensa. Para resolver este problema, Isaac Newton inventó un

nuevo tipo de telescopio que en lugar de lentes utilizaba un espejo en el que «rebotaba» la luz; de ahí el nombre de «reflector». Los telescopios reflectores prosperaron durante los dos siglos siguientes, alcanzando a finales del siglo XVIII, con el astrónomo de origen alemán afincado en Inglaterra William Herschel (1738-1822) grandes dimensiones: el mayor de los que construyó tenía una longitud de 12 metros y un espejo de 1,15 metros (con uno de los que construyó descubrió, en 1781, el planeta Urano).

[13]. Citado en Wright, Warnow y Weiner, eds. (1972: 42).

[14]. Citado en Wright, Warnow y Weiner, eds. (1972: 45).

[15]. Es oportuno recordar en este punto algo que dijo Arthur Eddington (1933: 131): «Un telescopio grande no es siempre un buen telescopio; su bondad depende de que las superficies de las lentes o de los espejos posean las características debidas con toda perfección».

[16]. Para más detalles de la construcción de este y otros telescopios de Monte Wilson, véase Sandage (2004: 169-177) y Christianson (1995: 115-120)

[17]. Se trata de James Edward Keeler, que desarrolló la mayor parte de su carrera en el Observatorio Lick (Monte Hamilton, California). Es posible que Slipher se refiera al trabajo de Keeler (1894), donde se recogen espectros que obtuvo de la nebulosa de Orión (la que él más estudió) y de otras trece nebulosas más, Andrómeda entre ellas. Buenas referencias para conocer la obra de Keeler son Campbell (1900) y Osterbrock (1984).

[18]. William Huggins se refirió a sus observaciones espectroscópicas de Andrómeda en Huggins (1897; reproducido en Becker 2011; ver 337). Julius Scheiner (1858-1913); ver Scheiner (1899). Edward Fath (1880-1959); ver Fath (1909). Maximilian Wolf (1863-1932); ver Wolf (1908).

[19]. Sobre este punto, ver Christianson (1995; especialmente 91-93).

[20]. La revolución cuántica también aportó grandes novedades en ese tipo de conceptos, en la causalidad y la naturaleza de la realidad, principalmente, pero la forma en que afectó a la filosofía fue diferente, inevitablemente posterior y más «diluida» en el tiempo. Una magnífica referencia para lo relativo a la física cuántica y la filosofía es Jammer (1974).

[21]. Me he ocupado de este tema en Sánchez Ron (2007 b).

[22]. Schlick había llegado a Viena en 1922 para ocupar la cátedra de Filosofía de las Ciencias Inductivas que anteriormente habían desempeñado Ernst Mach y otro físico con intereses filosóficos, el gran Ludwig Boltzmann.

[23]. Buchwald, Sauer, Rosenkranz, Illy y Holmes, eds. (2006: 313-314).

[24]. He tratado este caso con mucho mayor detenimiento en Sánchez Ron (2012).

[25]. Whitehead (1919, 1920, 1922).

[26]. El primer artículo que Russell dedicó a la relatividad se publicó en 1919 (Russell 1919).

[27]. He estudiado el origen y desarrollo de la física cuántica hasta 1925, en Sánchez Ron (2001).

[28]. Citado en Sánchez Ron (1991: xxxvi), donde se dan más detalles del libro de Von Neumann; ver también Rédei y Stöltzner, eds. (2001). Estrictamente, las aportaciones matemáticas de Von Neumann en este punto son: creó la noción de espacio de Hilbert tal y como la conocemos en la actualidad, dentro del contexto del análisis funcional, del que también fue uno de sus creadores, formuló de manera general el problema de autovalores para operadores autoadjuntos en base a la teoría espectral sin recurrir a la noción de la función delta de Dirac, y estableció la teoría de operadores no acotados.

[29]. El de Thomson no fue el único intento temprano por utilizar el electrón en la química. En 1901, dos químicos alemanes, Richard Abegg y Guido Bodländer, publicaron un artículo en el que proponían un sistema de números de valencia positivos y negativos para cada elemento, de manera que la suma de los números positivos y negativos fuese, independientemente de los signos, siempre 8, un número que aparecía en el modelo atómico de Thomson, como la segunda configuración estable para una órbita electrónica (la primera configuración la formaban 2 electrones). En 1904, Abegg hizo hincapié en este resultado en un artículo titulado «Valencia y el sistema periódico. Aproximación a una teoría de los compuestos moleculares», en el que formuló de manera explícita la «regla de ocho», señalando que una característica de la tabla periódica era que las valencias variables («valencias principales» y «contra-valencias» en su

formulación) de los átomos de un compuesto parecían sumar siempre 8.

[30]. Para más información sobre estos desarrollos, al igual que para algunos de los mencionados antes y los que siguen, véase Gavroglu y Simões (2012) y Hettema (2000).

[31]. Citado en Buckingham (1987: 112).

[32]. Existen dos magníficas biografías de Dirac: Kragh (1990) y Farmelo (2009).

[33]. La primera edición del libro de Whittaker data de 1904; la segunda apareció en 1917, publicándose después una tercera en 1927 y una cuarta en 1937. El ejemplar que yo he consultado es la cuarta edición; Dirac debió consultar bien la primera o la segunda. Poisson introdujo estos corchetes en 1809 (Poisson 1809).

[34]. Se tradujo, asimismo, al francés (1931), ruso (1932), japonés (1936) y español (Principios de mecánica cuántica, Barcelona, Ariel 1967; traducción de la cuarta edición inglesa).

[35]. En 1945, Harish-Chandra se trasladó a Cambridge, donde trabajó bajo la supervisión de Dirac (se doctoró en 1947). Desde 1963, trabajó en el Instituto de Estudio Avanzado de Princeton, donde pronto se dedicó a las matemáticas.

[36]. Algo de esa reacción se puede encontrar en Brown (2006).

[37]. En Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, Von Neumann (1932; 1991: 252-253) explicaba con claridad ese punto: «a la Mecánica cuántica [...] la hiere su carácter no-relativista, que distingue el tiempo t frente a las tres coordenadas espaciales y presupone un concepto objetivo de simultaneidad. En efecto, mientras todas las restantes magnitudes (en particular las coordenadas x, y, z, esencialmente ligadas con t por la transformación de Lorentz) están representadas por operadores, al tiempo le corresponde, como en la Mecánica clásica, un parámetro numérico ordinario t. O también: un sistema constituido por dos partículas posee una función de onda que depende de sus 2 × 3 = 6 coordenadas espaciales y únicamente de un tiempo t, aunque en virtud de la transformación de Lorentz, convendrían dos tiempos».

[38]. Sobre este asunto, ver Kragh (1982),

[39]. El espín es una propiedad intrínseca (un número cuántico) de las partículas elementales. Fue introducido en 1925 por los holandeses George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit (Uhlenbeck y Goudsmit 1925) con relación al electrón, como una especie de momento angular intrínseco (Ralph Kronig había tenido antes la misma idea, pero no la publicó, desanimado por Wolfgang Pauli). Las partículas con espín semientero (½ como el electrón) se denominan «fermiones» y obedecen a la «estadística de Fermi-Dirac», y las de espín entero, o «bosones» (el fotón es una de ellas), a la «estadística de Bose-Einstein». Estas estadísticas suministran, junto al principio de exclusión de Pauli, «mecanismos» operativos muy importantes en la física cuántica. El espín del electrón desempeña un papel fundamental en la física, la química y en muchos aspectos del comportamiento de la materia ordinaria, como en los fenómenos magnéticos.

[40]. Ahora sabemos que los rayos cósmicos tienen orígenes diversos: los de menor energía proceden del Sol, mientras que los de mayor energía llegan desde lugares desconocidos del Universo. La cámara de niebla empleada para hacer visibles los rayos cósmicos fue inventada por Charles T. R. Wilson, en 1910, mientras trabajaba en el Laboratorio Cavendish de Cambridge (por este logro recibió el Premio Nobel de Física en 1927). Su estructura (cilíndrica y de 7,5 cm de diámetro) es la siguiente: en un espacio superior, cerrado por arriba con una lámina de cristal que permite la observación y por debajo por un émbolo móvil, existe aire saturado de vapor de agua; desplazando el émbolo súbitamente hacia abajo, el aire se dilata y se enfría, y el vapor de agua, que entonces queda sobresaturado, tiende a la condensación, aunque se le puede mantener durante cierto tiempo en estado de sobresaturación. Si durante ese tiempo una partícula ionizante atraviesa la cámara, va arrancando a lo largo de su recorrido electrones a los átomos que se encuentran en el aire, de suerte que las moléculas de agua quedan electrizadas positivamente. Estos iones favorecen la condensación del vapor sobresaturado, formando núcleos, es decir, pequeñas gotas de agua. De esta manera, se produce a lo largo de la trayectoria de la partícula ionizante una fina huella o rastro de gotitas de agua, del mismo modo que un avión volando a gran altura deja una estela de condensación que permite ver fácilmente su trayectoria.

[41]. Anderson conocía esta circunstancia: al final de su artículo, escribió (Anderson 1933: 494): «Mientras este artículo estaba en preparación, noticias en la prensa han anunciado que, en un amplio estudio de las trazas de rayos cósmicos, P. M. S. Blackett y G. Occhialini también han obtenido evidencia de la existencia de partículas positivas ligeras, confirmando nuestro informe anterior».

Por su descubrimiento, Anderson obtuvo el Premio Nobel de Física de 1936, compartido con el descubridor de los rayos cósmicos, Victor Hess.

[42]. Aunque Anderson fue el primero en anunciar (en septiembre de 1932) la existencia de una partícula con carga positiva y masa mucho más pequeña que la del protón, muchos físicos soviéticos relacionaron el descubrimiento del positrón con el artículo —que se publicó seis meses después— de Blackett y Occhialini, que incluía muchas fotografías de trazas de electrones positivos y los interpretaba desde el punto de vista de la teoría de Dirac. La comparación que hace Tamm con Leverrier y Adams se refiere a la predicción que ambos hicieron, de manera independiente, de la existencia de Neptuno, que fue confirmada observacionalmente por J. G. Galle. Las ideas que expresaba aquí Tamm no son las que después quedaron establecidas: el positrón es una partícula estable, y el neutrón no es una partícula compleja formada por un protón y un electrón.

[43]. Para más detalles sobre el tema de las fuerzas nucleares, véase Brown y Rechenberg (1996) y, en concreto, sobre la predicción del mesón por parte de Yukawa, véase Brown (1981).

[44]. La primera vez que Pauli se atrevió a proponer la existencia de una nueva partícula para resolver el rompecabezas de la radiación ß fue en una «carta abierta» que envió, a través de un colega, a una reunión de física que se celebró en Tubinga, y a la que estaba invitado pero no pudo asistir. Merece la pena reproducir algunos pasajes de esa misiva (citada en Brown 1978; Weart y Phillips, eds. 1985: 344): «Zurich, 4 de diciembre de 1930./ Instituto de Física del Instituto Federal de Tecnología (ETH), Zurich./ Queridas señoras y señores radiactivos/ Como les explicará de manera más exacta el portador de estas líneas, al que les pido escuchen atentamente, considerando la "falsa" estadística de los núcleos del N-14 y del Li-6, al igual que el espectro continuo ß, he dado con un remedio desesperado para salvar el "teorema de intercambio" de estadística al igual que el teorema de la energía. A saber, es posible que puedan existir en los núcleos partículas eléctricamente neutras, que deseo llamar neutrones, que poseen espín 1/2 y obedecen al principio de exclusión, y además difieren de los cuantos de luz en que no viajan con la velocidad de la luz. La masa del neutrón debe ser del mismo orden de magnitud que la masa del electrón y, en cualquier caso, no mayor que 0,01 la masa del protón. El espectro continuo ß se podría comprender entonces suponiendo que en la desintegración ß se emite un neutrón con el electrón, de tal forma que la suma de las energías del neutrón y

el electrón es constante». Obsérvese que Pauli empleaba el nombre «neutrón» para una partícula hipotética que no tiene nada que ver con lo que ahora llamamos neutrón. Pero es que Pauli propuso aquel nombre en 1930, y el neutrón «auténtico» se descubrió más tarde, en 1932. Y además, entonces Pauli no defendió su propuesta con gran vehemencia. Fue Fermi (1933) quien introdujo el término «neutrino» (en italiano «pequeño neutrón»). Más información en Sánchez Ron (2000: 188-189).

[45]. Recordemos que cada elemento tiene un número de protones determinado, en tanto el número de neutrones puede ser distinto al de protones. La suma de protones y neutrones es lo que distingue a los isótopos. El hidrógeno tiene tres formas, con masa 1, 2 y 3, que identifican al elemento «común» y a sus dos isótopos; deuterio y tritio.

[46]. Yukawa nació en Tokio, pero estudió y se graduó (1929) en Kioto. Entre 1932 y 1939 enseñó e investigó en las Universidades de Kioto y de Osaka (aquí fue donde publicó su artículo de 1935). En 1938 obtuvo el doctorado y el año siguiente una cátedra de Física Teórica en Kioto, donde permaneció el resto de su carrera.

[47]. Si los mesones π (o piones) no se habían detectado antes fue porque son inestables y se desintegran en electrones o muones μ (o, simplemente, muones) y neutrinos en cienmillonésimas de segundo. Se pueden encontrar más detalles técnicos acerca de estos y otros descubrimientos en un libro escrito por otro de los participantes en aquella empresa científica: Rossi (1964). Permítaseme usar la cita que abría este libro, debida al eminente físico estadounidense Karl K. Darrow: «El tema [de los rayos cósmicos] es único en la física moderna por lo minúsculo del fenómeno, la delicadeza de las observaciones, las aventureras excursiones de los observadores, la sutileza de los análisis y la grandeza de las inferencias». Con «las aventureras excursiones de los observadores», se aludía a que, con frecuencia, los experimentos se efectuaban en observatorios situados en montañas de gran altura, para tener así mejores oportunidades de estudiar los rayos cósmicos.

[48]. Para más detalles, ver Bartholomew (1989). Por ser quien es su autor, también es interesante Tomonaga (1997: 222-230).

[49]. Los temas tratados en esta sección son demasiado complejos y extensos como para pretender que lo que contiene hace justicia a lo que sucedió. Aunque

la bibliografía que se ocupa de ellos es extraordinariamente extensa, se puede obtener una buena idea en Schweber (1994 a), Mehra y Rechenberg (2001), Schwinger, ed. (1958), Miller (1994), Pais (1986) y Weinberg (1977 b).

[50]. En una conferencia internacional de física, organizada por la International Union of Pure and Applied Physics y la Physical Society de Londres, ciudad esta donde se celebró en 1934, Max Born (1935: 19) definió la electrodinámica cuántica de la siguiente manera: «Con la expresión "electrodinámica cuántica" entiendo cualquier intento de formular una teoría que describa simultáneamente el comportamiento del campo electromagnético y el movimiento de todo tipo de partículas en conformidad con los principios de la teoría cuántica».

[51]. Sobre la historia del concepto de creación y aniquilación de partículas, que tiene precedentes anteriores a la electrodinámica cuántica, véase Bromberg (1976).

[52]. Jordan escribió en total cinco artículos sobre el tema. Dos de los cinco fueron en solitario por Jordan; los otros tres, con Oskar Klein, con Wolfgang Pauli y el último con Eugene Wigner.

[53]. En la entrevista que Thomas Kuhn realizó a Oppenheimer el 20 de noviembre de 1963, como parte del proyecto «Sources on the History of Quantum Physics», este manifestó: «Cuando llegué a Zúrich, Pauli me contó algo de su trabajo con Heisenberg y yo mostré, supongo, algo más que un pequeño interés en él. Se encontraba en un estado horroroso y, a ratos, trabajamos juntos [...] Al principio pensamos que los tres deberíamos publicar juntos; luego Pauli pensó que él publicaría conmigo y luego pareció mejor hacer alguna referencia a lo que hicimos en su artículo [de Heisenberg y Pauli] y dejarlo para una publicación aparte». Finalmente, Pauli cambió de idea y Oppenheimer terminó publicando en solitario el trabajo.

[54]. Citado en Cassidy (1981: 8-9).

[55]. «La cuestión de las limitaciones en la mensurabilidad del campo electromagnético», se lee en el artículo de Bohr y Rosenfeld (1933: 3; 1979: 357), «enraizada en el cuanto de acción, ha adquirido un interés particular en el curso de las discusiones sobre las todavía no resueltas dificultades en la mecánica atómica relativista». Sobre los trabajos de Landau-Peierls y Bohr-Rosenfeld, ver Jacobsen (2012: 61-90).

[56]. El Radiation Laboratory se ocupaba casi exclusivamente de desarrollar las técnicas necesarias para fabricar radares (sistemas de radio detection and ranging, esto es, de detección y localización) en el rango de las microondas; metas concretas a alcanzar eran: I) la de mayor prioridad, desarrollar un radar que utilizase radiaciones de 10 centímetros de longitud de onda que se pudiese instalar en aviones y utilizarse para detectar otras aeronaves; II) desarrollar un radar de precisión para ser utilizado por la artillería en sus disparos; y III) desarrollar un sistema de radar de largo alcance para la navegación marina.

[57]. Más concretamente, la teoría de Dirac predecía que los estados atómicos 2S½ y 2P½ tenían la misma energía (2S½ designa el segundo nivel principal de energía del átomo de hidrógeno, con momento angular 0 y un momento angular total de ½; 2P½ también representa el segundo nivel principal de energía del átomo de hidrógeno, con momento angular 1 y un momento angular total de ½.

[58]. Hallaron que el nivel 2S½ supera al 2P½ en 4,4 × 10-6 eV (electrón-voltios).

[59]. Los asistentes fueron: Hans Bethe, David Bohm, Gregory Breit, Karl Darrow, Herman Feshbach, Richard Feynman, Hans Kramers, Willis Lamb, Duncan McInnes, Robert Marshak, John von Neumann, Arnold Nordsieck, Abraham Pais, Linus Pauling, Isidor Rabi, Bruno Rossi, Julian Schwinger, Robert Serber, Edward Teller, George Uhlenbeck, John van Vleck, Victor Weisskopf y John A. Wheeler.

[60]. Hans Bethe —ya nos ha aparecido en una ocasión y volverá a hacerlo, tanto en este capítulo como en otros— fue uno de los grandes físicos del siglo XX. Para saber acerca de él, consultar Schweber (2012) y Brown y Lee, eds. (2006).

[61]. Sobre Feynman, ver Gleick (1992) y Mehra (1994).

[62]. Básicamente, la invariancia gauge, de la que tendré más que decir en los capítulos 3 y 4, denota la libertad de modificar la expresión matemática del campo electromagnético sin que afecte a sus efectos físicos. Sobre Schwinger, véase Mehra y Milton (2000).

[63]. De acuerdo con la ecuación de Schrödinger, g era un simple parámetro de valor arbitrario. Según la teoría clásica, sería simplemente 1.

[64]. Un excelente análisis de la difusión de los diagramas de Feynman se halla en Kaiser (2005).

[65]. Sobre Dyson, un hombre polifacético, que ha cultivado diversos campos, ver Schewe (2013) y Dyson (1996).

[66]. Una reconstrucción más completa del camino que condujo a la renormalización, debería detenerse en nombres como los de Heisenberg, que en 1943 introdujo procedimientos para eliminar divergencias en sus trabajos sobre la matriz S (con la que se calcula lo que sucede en procesos de scattering), y en un físico suizo poco conocido, Ernst Stueckelberg (sobre él, véase Lacki, Ruegg y Wanders, eds. 2009). La matriz S responde a un enfoque positivista con el que se pretendía reemplazar la teoría cuántica de campos por una teoría en la que apareciesen únicamente magnitudes medibles. Fue introducida de manera independiente por John Wheeler (1937) y Heisenberg (1943).

[67]. Las ideas de Kramers se explican en Dresden (1987: cap. 16).

[68]. Existe una reedición en Brown, ed. (2005).

[69]. Se trata de Surely You are Joking, Mr. Feynman (1985) y What Do You Care What Other People Think? (1988): Feynman (1987, 1990).

[70]. Al permitir un momento singular, el del gran estallido, la cosmología del Big Bang únicamente exigía la invariancia con respecto al espacio, no la homogeneidad con respecto al tiempo. Bondi había abandonado su Viena natal en 1937 para estudiar en el Trinity College de Cambridge, el mismo college al que llegó Gold en 1939 para estudiar ingeniería. Al comenzar la guerra contra Alemania, y pese a ser de origen judío, ambos fueron internados en la isla de Man, desde donde fueron enviados a Canadá, lugar en el que se hicieron amigos. En agosto de 1941 fueron liberados y devueltos a Cambridge; unos meses después, Bondi estaba aplicando sus conocimientos matemáticos al desarrollo del radar, tarea en la que conoció a Hoyle, al que convenció para que reclutara también a Gold (Hoyle dirigía una de las secciones del Admiral Signal Establishment británico).

[71]. Sobre Milne, véase Weston-Smith (2013).

[72]. El Pyrex procedía de un vidrio desarrollado por primera vez por el vidriero alemán Otto Schott a finales del siglo XIX, que se vendió a partir de 1893 bajo

el nombre de «Duran». Finamente, y ya utilizado el Pyrex para el espejo de 5 metros, se consiguió desarrollar métodos que utilizaban silicatos fundidos o vidrio cerámico, solidificados mediante un proceso de expansión a presiones muy bajas. El nuevo tipo de material tenía un coeficiente de expansión prácticamente cero a las temperaturas a las que se utilizan los telescopios; además, se podía conseguir un vidrio con estructura estriada, que permitía alcanzar el equilibrio térmico más rápidamente. La mayoría de los grandes telescopios, después del de Palomar, utilizaron este material (una excepción fue el telescopio «Isaac Newton» que se instaló en 1968 en el Observatorio de Greenwich, Londres, y que también empleó Pyrex).

[73]. Sobre Hoyle, véase su autobiografía (Hoyle 1994), Mitton (2005) y Gough, ed. (2005).

[74]. Para más información véase su autobiografía (Bondi 1990).

[75]. Sobre Baade, véase Osterbrock (2001).

[76]. Los trabajos dirigidos a determinar la edad del Universo se han sucedido constantemente a lo largo de los años. En 1994, por ejemplo, André Maeder (1994) presentó evidencias de que la edad de los cúmulos globulares más viejos era de, aproximadamente, $16 \cdot 10^9$ años; ver Longair (2006: 346-349). En la actualidad, los mejores resultados dan una edad de $13{,}798 \cdot 10^9$ años, con una incertidumbre de 37 millones de años (Planck collaboration 2013, Bennet et al. 2013).

[77]. El espectro, o «ventana óptica», que eran capaces de observar —utilizando placas fotográficas de gran sensibilidad— los telescopios «clásicos» cubría un rango que iba, aproximadamente, de los 3.000 a los 10.000 amstrongs (Å). 1 Å=10-10 metros. Las ondas de radio cósmicas se originan por los cambios de velocidad de los electrones, bien de electrones que se mueven a bajas velocidades (del orden de decenas o centenares de kilómetros por segundo) en nubes de gas que rodean a estrellas, o de electrones que, como consecuencia de explosiones estelares, han sido acelerados de manera que viajan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

[78] . Sobre Jansky y su descubrimiento, consultar Sullivan III (1984a).

[79]. Whipple permaneció toda su vida en Harvard, donde ocupó la cátedra de Astronomía desde 1950 hasta 1977, puesto que compatibilizó entre 1955 y 1973

con la dirección del Observatorio de Astrofísica de la Smithsonian. En cuanto a Jesse Greenstein (1909-2002), un personaje importante en el desarrollo de la astronomía posterior a 1945, después de trabajar en el Observatorio Yerkes se trasladó, en 1947, al California Institute of Technology, donde dirigió los programas de astronomía hasta 1972; posteriormente trabajó en programas secretos de reconocimiento de satélites; ver Greenstein (1990) y DeVorkin (1989; 57-59).

[80]. Sobre Reber, véase Tyson (2003). En 1945 aceptó, de mala gana, un puesto en el National Bureau of Standards (Washington DC), trasladando allí su antena, pero frustrado por la burocracia gubernamental y por la atmósfera política (eran los años de las persecuciones de McCarthy), en 1951, con una generosa ayuda de la Research Corporation de Nueva York, se trasladó a Hawái donde trabajó no solo en radioastronomía, sino también en la física de la atmósfera y la ionosfera. Finalmente, en 1954 se instaló en Tasmania (Australia), donde continuó con sus estudios apoyado por la Universidad de Tasmania.

[81]. La estructura básica de un radiotelescopio es la siguiente: las ondas de radio que llegan al disco se reflejan hacia un foco colocado en el centro del disco pero por encima de él; allí, amplificadores convierten las radioseñales concentradas en pequeñas corrientes eléctricas que se envían a la sala de control donde son amplificadas más de un millón de veces antes de ser procesadas en un computador, o mostradas de manera que el radioastrónomo pueda estudiar las señales. A los instrumentos que miden las radiaciones se les denomina «radiómetros». Al principio, eso sí, los radiotelescopios consistían en campos cubiertos de redes y telas de redes metálicas; pero tales estructuras eran demasiado grandes para apuntar a uno u otro objeto celeste: hacían pasivamente un mapa del cielo de radio a medida que la Tierra rotaba.

[82]. Para más información sobre estos puntos y, en general, sobre la historia de la radioastronomía, véase Reber (1984), Sullivan III (1984b), Struve y Zebergs (1962: 91-109) y Munns (2013).

[83]. Reber y Greenstein (1947) llegaron a publicar un artículo juntos, la primera revisión de conjunto sobre el estado de la radioastronomía publicada en una revista.

[84]. La primera patente de un modelo de radar que funcionaba, se debió a Robert A. Watson-Watt, del National Physical Laboratory británico. Fue

presentada el 17 de septiembre de 1935.

[85]. Ver en este sentido, Lovell (1991) y Bowen (1998). También Munns (2013).

[86]. La línea en cuestión fue detectada 7 años más tarde: Ewen y Purcell (1951). Gracias a la detección de nubes de hidrógeno mediante esta técnica, fue posible descubrir los «brazos» de la Vía Láctea; esto es, su estructura espiral.

[87]. Ver la entrevista que David DeVorkin (1997) realizó a Oort el 10 de noviembre de 1977. Sobre los inicios de la radioastronomía en Holanda, ver Van Woerden y Strong (2006).

[88]. Citado en Sullivan III (2000: 245).

[89]. Ver Munns (2003; 2013: capítulo 5).

[90]. Este acuerdo interuniversitario seguía el patrón del Brookhaven National Laboratory, creado mediante un acuerdo alcanzado en 1946 entre varias universidades de la costa este de Estados Unidos. Precisamente para ello se creó la Associated Universities, Inc. Ver Sánchez Ron (2007 a: 819).

[91]. Para la historia de Jodrell Bank, ver Lovell (1968). Aunque no me he referido a él, es de justicia recordar los trabajos pioneros que James S. Hey (1909-2000) realizó en favor del comienzo de la radioastronomía en Inglaterra, trabajos anteriores incluso a los de Lovell y Ryle; veáse Hey (1971). También en su caso, sus primeros trabajos fueron durante la guerra: al ocuparse de analizar las interferencias en los equipos de radar, el Ejército encontró en 1942 que el Sol emitía una intensa radiación en el rango de las radiofrecuencias. Tras la guerra, Hey ayudó a Lovell a montar sus primeras instalaciones de radar en Manchester. Sobre los comienzos de la radioastronomía en Gran Bretaña, consultar Edge y Mulkay (1976).

[92]. Sobre los inicios de la radioastronomía en Australia, consultar Bowen (1984) y Kerr (1984).

[93]. Para más información acerca de los inicios de la astronomía de rayos X, véase Adams (1980).

[94]. Una exposición más equilibrada de las tensas relaciones entre Hoyle y

Ryle se encuentra en Mitton (2005: cap. 7). Sobre las teorías de Hoyle y Narlikar, véase Hoyle y Narlikar (1961, 1974) y Sánchez Ron (1990).

[95]. En octubre de 1950, Karl Compton advertía del peligro de una agresión militar, señalando que «Estados Unidos no puede llegar a los números [de soldados] de nuestros adversarios potenciales [...] Nuestra principal fuente de superioridad militar reside en los desarrollos tecnológicos que multiplican la efectividad de lucha per cápita de nuestras fuerzas»; citado en Kevles (1990: 249-250).

[96]. No obstante su importancia, no haré referencia aquí a la invención del transistor (1947), ya que este es un «hijo de la física cuántica», por lo que se tratará en el capítulo 3.

[97]. La televisión es deudora de ideas y desarrollos que tuvieron lugar en el siglo XIX, como el disco que inventó en 1884 el alemán Paul Nipkow: tenía 24 agujeros repartidos uniformemente a lo largo de una espiral, y cuando el disco giraba a 600 revoluciones por minuto hacía pasar la luz procedente de una célula fotovoltaica de selenio por esos agujeros, convirtiéndola en puntos luminosos que se reunían, enfocándolos con una lente, obteniendo una imagen aunque un tanto borrosa. En 1906 Boris Rosing, del Instituto Tecnológico de San Petersburgo, combinó la idea del disco con un aparato que construyó en 1897 el físico alemán Ferdinand Braun, el tubo de rayos catódicos, la base de los posteriores receptores de televisión. La idea de Rosing fue dirigir, modulándolas, las señales procedentes del disco de Nipkow hacia la pantalla del tubo de rayos catódicos. Aunque en realidad las imágenes que se obtenían eran discontinuas, gracias a la persistencia de estas en la retina humana, se producía la ilusión de una imagen continua. La idea fue desarrollada por otros, entre ellos el escocés John Logie Baird, que a partir de 1926 consiguió transmitir imágenes a Estados Unidos utilizando una emisora de onda corta. En 1927, la ATT (American Telegraph and Telephone) produjo una emisión experimental en la que aparecía el candidato a la presidencia del país, Herbert Hoover. El año siguiente, General Electrics ponía a la venta el primer aparato de televisión comercial, emitiendo al mismo tiempo una primera producción. En septiembre de 1929, la BBC comenzaba a emitir programas, algo que también hizo el Servicio Postal alemán, mientras que los Laboratorios Bell enviaban imágenes en color de Washington a Nueva York, utilizando tres canales separados para transmitir los colores primarios: rojo, verde y azul. En 1932, Vladimir Zworyking, un discípulo de Rosing que tras la revolución de 1917 emigró a Estados Unidos, donde en 1929

se convirtió en director de investigación de RCA (Radio Corporation of America), supervisó desde este puesto la instalación de los estudios de televisión de la NBC situados en el Empire State Building de Nueva York (las emisiones regulares comenzaron en 1939, y se iniciaron mostrando al presidente F. D. Roosevelt inaugurando la Exposición Universal de Nueva York). En Alemania, las emisiones comenzaron en 1935 desde Berlín (el año siguiente se emitieron algunas pruebas de los Juegos Olímpicos celebrados en esta misma ciudad).

[98]. Datos tomados de Electronics (2980: 276).

[99]. Estrictamente, se trató del Sputnik I, ya que el 3 de noviembre se lanzó otro satélite: Sputnik II, que pesaba 508 kilogramos y que llevaba un pasajero vivo: la perra Laika.

[100]. Este hecho, el que los cohetes soviéticos pudiesen poner en órbita un peso semejante era lo que más preocupaba a los estadounidenses: significaba que la Unión Soviética estaba más adelantada de lo que pensaban, que, de hecho, les superaba en este apartado, puesto que la carga que Estados Unidos iba a colocar en órbita, con su primer satélite del Año Geofísico Internacional, era de unos 2 kilogramos. Finalmente, Estados Unidos puso en órbita un satélite el 31 de enero de 1958, el Explorer 1. Pesaba 15 kilogramos, esto es, mucho menos que el Sputnik 1; aun así realizó un descubrimiento importante: la existencia de un anillo de elevada radiación que rodea la Tierra, el denominado «cinturón de van Allen».

[101]. Antes de Truman, otros presidentes de Estados Unidos habían tomado alguna acción para fomentar o utilizar la ciencia y la tecnología. Así, por ejemplo, George Washington (1732-1799) promovió la primera Ley de Patentes; a comienzos del siglo XIX, Thomas Jefferson (1743-1826), muy interesado en la ciencia (recuérdese su Notes on the State of Virginia, publicado en París en 1782), planeó y organizó una expedición, dirigida por Meriwether Lewis y George Roger Clark, para reconocer los dominios bañados por el río Missouri, y estableció un departamento para preparar planos sobre las costas (el Coast Survey); profundamente interesado en la astronomía, John Quincy Adams, responsable de la creación de la Smithsonian Institution, defendió el establecimiento de «faros del cielo», así como la creación de una academia para la marina, análoga a West Point, la academia de oficiales para el ejército de tierra; y en 1933, Franklin D. Roosevelt estableció una Science Advisory Board (Junta Asesora para la Ciencia), poniendo al frente al físico Karl Taylor

Compton, presidente del MIT (esta Junta fue el precedente sobre el que Truman organizó en 1951 el ya mencionado Science Advisory Committee). A pesar de lo que pueden sugerirnos tales iniciativas, ninguna —salvo si acaso las de Roosevelt y Truman— pueden compararse en importancia y extensión con la que tuvo la de Eisenhower. Para la historia de estos precedentes, ver Dupree (1957).

[102]. La NACA se fundó en 1915, y fue responsable de la mayor parte de las innovaciones introducidas en los aviones estadounidenses con anterioridad a la Segunda Guerra Mundial.

[103]. Además de para las telecomunicaciones, los satélites cumplen muchas otras funciones. Una de ellas es la obtención de información meteorológica. El primer satélite de este tipo, el Vanguard 2, se lanzó el 17 de febrero de 1959 y tenía como fin principal medir la superficie de las nubes, aunque su misión no tuvo demasiado éxito. Diferente fue el caso de TIROS-1, lanzado por la NASA el 1 de abril de 1960, que se mantuvo operativo durante 78 días allanando el camino a otros programas de satélites meteorológicos. Particularmente famosos son los Meteosat, una serie de satélites geoestacionarios (propiedad de la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos, EUMETSAT), situados sobre el Océano Atlántico, construidos y lanzados por la Agencia Espacial Europea (ESA).

[104]. Gamow, que formaba parte del Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Estatal de Leningrado, donde trabajaban luminarias como Lev Landau, Matvei Bronstein, Dmitri Ivanenko y Vladimir Fock (el líder del grupo) salió de Rusia por primera vez en 1928. En 1931, Enrico Fermi organizó un congreso de Física Nuclear en Roma, e invitó a Gamow para que diese una de las conferencias principales, pero las autoridades soviéticas no le concedieron el correspondiente visado. Con el apoyo de Landau, sin haber cumplido treinta años, fue elegido miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS, la institución más prestigiosa del Estado. Herido por no haber podido asistir al congreso de Roma, Gamow decidió abandonar Rusia. En septiembre de 1933 fue invitado a participar en el exclusivo Consejo Solvay, en Bruselas. Esta vez se le concedió el permiso para viajar al extranjero, pero sin su esposa, lo que originó una serie de actuaciones que condujeron finalmente a que también ella obtuviese el permiso. Fue en realidad el pasaporte que les permitió abandonar definitivamente la URSS. Además de las referencias que aparecen más adelante, para más información sobre la obra de Gamow, ver Reines, ed. (1972) y

Khalatnikov (2012: 58-65), quien fue testigo de los sucesos que llevaron a Gamow al exilio.

[105]. El que la radiación corresponde a la de un cuerpo negro es algo que fue confirmando al realizar observaciones a diferentes longitudes de onda y comprobar que la forma de la radiación era la misma que la de un cuerpo negro. La relación entre temperaturas y longitudes de onda se puede obtener a partir de leyes como la de Stefan-Boltzmann, Wien o Planck. La relación entre grados Celsius (C) y kelvin (K) viene definida por las relaciones siguientes: 0° C equivale a 273,15 K y 100° C a 373,15 K.

[106]. Citado en Gertner (2012: 212).

[107]. El número completo del 4 de julio de 1961 de la revista The Bell System Technical Journal, en el que se publicó el artículo de Ohm, estaba dedicado al Proyecto Echo.

[108]. En Wilson (1990) se encuentra una reconstrucción del descubrimiento. Ver asimismo, Kragh (1996) y Alpher y Herman (2001).

[109]. El desplazamiento hacia el rojo, z, se define como el cociente entre ($\lambda 0 - \lambda e$) y λe, donde λo es la longitud de onda medida por el observador y λe la medida en la fuente de emisión. Cuanto más alejado se halla el emisor, más grande es la velocidad con que se aleja de nosotros, debido a la expansión del Universo, y por consiguiente mayor la longitud de onda que observamos, $\lambda 0$, lo que implica que la diferencia ($\lambda 0 - \lambda e$) será mayor y por tanto también z.

[110]. 1 megaparsec es igual a 1 millón de parsecs y 1 parsec equivale a 3,26 años-luz (1 año-luz=$9{,}46 \cdot 10^{12}$ km).

[111]. No todo el mundo estuvo de acuerdo en considerar que los cuásares eran objetos de luminosidad enorme situados a grandes distancias. Entre los que se opusieron se encuentran Fred Hoye, Geoffrey Burbidge y Halton Arp, que defendieron la idea de que se trataba de cuerpos celestes relativamente cercanos, no tan alejados como sugería el desplazamiento hacia el rojo de sus espectros, en cuyo caso no tendrían que ser tan grandes sus emisiones de radiación. Sobre la controversia acerca de los cuásares, véase Field, Arp y Bahcall (1973).

[112]. Definiré el «radio de Schwarzschild» más adelante.

[113]. Un hercio representa la cantidad de veces que se repite una onda cada segundo. Un megahercio es igual a 10^6 hercios.

[114]. Las enanas blancas son estrellas muy pequeñas (alrededor de una centésima del radio del Sol) y calientes, pero cuya masa es similar al Sol. Es por su elevada temperatura (del orden de 10.000 K) que se ven de color blanco.

[115]. Durante el seminario, por cierto, Hewish especuló que los púlsares debían ser vibraciones de enanas blancas, a lo que Hoyle respondió que en su opinión debía tratarse de restos de una supernova. Más información sobre este punto en Mitton (2005: 288). Tras su matrimonio, Bell tomó el apellido Bell Burnell.

[116]. Para más detalles del enfrentamiento Hoyle-Hewish, consultar Mitton (2005: 326-328).

[117]. He consultado este artículo en la versión electrónica que aparece en la revista Cosmic Search, vol. 1, nº. 1 (http://www.bigear.or/vol1no1/burnel.htm).

[118]. Una vez que completó su tesis doctoral (1969), Bell abandonó el campo de la radioastronomía, pasándose a la astronomía de rayos gamma. Trabajó en la Universidad de Southampton (1968–1973), University College de Londres (1974–1982) y el Observatorio Real de Edimburgo (1982–1991). En 1991 pasó a la Open University, como catedrática de Física hasta 2001, año en el que se trasladó a la Universidad de Bath, como decana de Ciencias (puesto que desempeñó hasta 2004). Ha sido presidente de la Royal Astronomical Society (2002-2004) y del Institute of Physics (2008-2010), además de visiting professor de Astrofísica en la Universidad de Oxford.

[119]. La luminosidad de aquella nova se podía comparar a Venus; a partir de diciembre su brillo comenzó a disminuir, desapareciendo finalmente de la vista en marzo de 1574. Tycho hizo públicas sus observaciones a través de un libro, De nova stella et nullius aeri memoria primus visa (Copenhague 1573); Muñoz hizo lo propio en Libro del nuevo cometa (Valencia 1573).

[120]. La comunicación de Chandrasekhar (1935) se publicó bajo el título de «Configuraciones estelares con núcleos degenerados».

[121]. La intervención de Eddington no favoreció, por decirlo de alguna manera, una posible carrera académica de Chandrasekhar en Gran Bretaña. Sin embargo, en enero de 1937 el distinguido astrónomo Otto Struve le ofreció un

puesto de profesor ayudante en la Universidad de Chicago, en la que permanecería el resto de su carrera, siendo Morton D. Hull Distinguished Service Professor de Astrofísica Teórica, a partir de 1952. En 1983, compartió el Premio Nobel de Física con William A. Fowler.

[122]. En la biografía de Landau abundan episodios que merecerían ser detallados, y que son mucho menos conocidos que los de otros científicos. Aunque, lamentablemente, no me puedo detener en ellos, sí mencionaré alguno. Durante las grandes purgas previas a la Segunda Guerra Mundial, Landau fue arrestado en 1938, al haber sido acusado de ser un espía para Alemania. Como el propio Landau manifestó: «Pasé un año en la cárcel y estaba claro que no podría soportar seis meses más; sencillamente, me estaba muriendo». Fue gracias al coraje del gran físico Piotr Kapitza, que escribió directamente a Stalin, Molotov y Beria, que Landau fue liberado; ver Boag, Rubinin y Shoenberg, eds. 1990: 67, 348-351. Para más información sobre Landau, véase Kojevnikov (2004).

[123]. En Zúrich, también con Pauli, se encontraba Rudolf Peierls; fue entonces cuando colaboraron en el artículo que mencioné en el capítulo 1 (Landau y Peierls 1931).

[124]. Los trabajos de Landau sobre teoría estelar se analizan en Hufbauer (2007).

[125]. Sobre los trabajos de Oppenheimer en astrofísica, véase Hufbauer (2005). Entre las numerosas biografías dedicadas a Oppenheimer, destaca la de Monk (2012).

[126]. En 1940, Volkoff regresó a Canadá, al Departamento de Física Teórica de la Universidad de British Columbia, donde transcurrió toda su carrera.

[127]. Serber ya nos apareció en el capítulo primero, con relación a otro artículo que escribió con Oppenheimer en 1937.

[128]. Según las estimaciones actuales, la masa mínima para que pueda existir una estrella de neutrones es, según la relatividad general, 0,1 masas solares, mientras que el máximo parece encontrarse en unas 6 masas solares. En el caso de una estrella de neutrones de 1 masa solar, su radio sería de unos 13 kilómetros y su densidad de $2 \cdot 10^{17}$ kg·m-3, alrededor de $2 \cdot 10^{14}$ veces la densidad del agua.

[129]. Entre los intereses científicos de Hilbert, la física ocupó un lugar notable.

Uno de esos intereses se centró (hacia 1913) en la teoría del campo electromagnético que Gustav Mie estaba intentando desarrollar por entonces. La característica más llamativa de esa teoría es que pretendía ser capaz de dar cuenta de la materia, de explicarla, en base únicamente al campo electromagnético (la materia sería, desde esta perspectiva, algo así como «concreciones» del campo, zonas de alta densidad de este). Pues bien, en noviembre de 1915, y en medio de un intenso intercambio epistolar con Einstein (que había dictado un curso de seis conferencias de dos horas cada una en Gotinga entre el 29 de junio y el 7 de julio de 1915, a las que asistió Hilbert), el día 20 de noviembre —esto es, cinco días antes que Einstein presentase el artículo en que establecía la formulación final de la relatividad general— Hilbert (1915) entregó para su publicación a la Academia de Ciencias de Gotinga un artículo titulado «Los fundamentos de la física». Este artículo apareció publicado el 31 de marzo de 1916, y cuando se lee encontramos que en él aparecen las ecuaciones del campo gravitacional que Einstein estableció en su artículo definitivo del 25 de noviembre. Si fue así, ¿no debería recaer el mérito del descubrimiento de la versión definitiva de la teoría de la relatividad general en Hilbert, por mucho que se reconozca que fue Einstein quien preparó el escenario principal (espacio-tiempo riemanniano; geometrización de la gravitación)? La respuesta a esta pregunta es negativa, y ello por dos motivos. El primero es porque la teoría hilbertiana no era realmente idéntica a la einsteiniana: solo era formalmente igual. Las ecuaciones del campo tenían la misma forma matemática que las de la relatividad general, pero, siguiendo el espíritu de la teoría de Mie, que Hilbert imitaba, el tensor de energía-momento que incluía era de naturaleza puramente electromagnética, lo que no ocurría en la teoría de Einstein. El segundo motivo es más importante y sorprendente. Resulta que el contenido de lo que presentó Hilbert a la Academia de Ciencias de Gotinga el 20 de noviembre no coincide con lo que apareció finalmente publicado. Como parte de su investigación en la historia del desarrollo de la relatividad general, en 1997 Leo Corry descubrió los ejemplares de las pruebas de imprenta del artículo del 20 de noviembre, corregidas (el 6 de diciembre) por el propio Hilbert (Corry, Renn y Stachel 1997). Y al estudiarlas, comprobó que Hilbert modificó lo que había presentado el 20 de noviembre teniendo en cuenta el contenido del artículo de Einstein del 25 de noviembre.

[130]. Básicamente, el tensor métrico suministra la distancia: $ds^2=g\alpha\beta(x)\cdot dx\alpha\cdot dx\beta$, donde α y β varían de 1 hasta n, siendo n la dimensión del espacio en cuestión. Ya traté de esta cuestión en el capítulo 1.

[131]. Hessenberg (1917), Levi-Civita (1917), Schouten (1918). Entre las contribuciones de Schouten a la geometría diferencial destaca su influyente libro Der Ricci-Kalkul (Schouten 1924), que fue vertido al inglés, aunque sustancialmente modificado, en 1954 bajo el título de Ricci-Calculus. Prácticamente toda la carrera científica de Schouten estuvo dedicada a la geometría diferencial y sus aplicaciones, incluyendo la teoría de la relatividad y las teorías de campo unificado. Para más información sobre las teorías de campo unificado, ver Tonnelat (1965) y Vizgin (1994).

[132]. Citada en Debever, ed. (1979: 4-5). Ver Cartan (1922, 1923).

[133]. Citado en Wünsch (2005: 285).

[134]. Con anterioridad, y junto a otro de sus ayudantes, Walther Mayer, un matemático natural de Graz (Austria) que había estudiado en el Politécnico de Zúrich, Viena, París y Gotinga, Einstein utilizó variedades espacio-temporales locales de cinco dimensiones (Einstein y Mayer 1931 a, b).

[135]. Ver, por ejemplo, Schrödinger (1943, 1944 a, b). Sobre estos trabajos de Schrödinger, consultar Hittmair (1987) y Sánchez Ron (1992).

[136]. He tratado este tema en Sánchez Ron (2003, 2004).

[137]. Aunque se trata de campos diferentes, existen algunos puntos comunes entre la fascinación, o el uso, que Paul Dirac y Einstein hicieron de las matemáticas en su física.

[138]. Darmois fue el director de tesis de Lichnerowicz; presentó su propia tesis en 1939, en la École Normale Supérieure, con el título Problèmes globaux en Mécanique Relativiste.

[139]. Cuando publicó (1952) el artículo que acabo de citar, lo firmó como Yvonne Fourès-Bruhat, utilizando el apellido de quien entonces era su marido. Fue cuando se casó con Gustave Choquet cuando adoptó Choquet-Bruhat.

[140]. Un hecho destacable de esta conferencia es que se celebró gracias al apoyo económico de las Fuerzas Aéreas estadounidenses. Lejos de constituir tal ayuda un hecho aislado, principalmente durante el periodo 1956-1972, la relatividad general se vio favorecida por este Cuerpo del Ejército de Estados Unidos (ver Goldberg 1992). El caso de la relatividad general no es sino un

ejemplo particular de una tendencia que se manifestó en Estados Unidos después de la Segunda Guerra Mundial, cuando todavía no existía una agencia civil para apoyar la investigación básica. Especialmente importante fue la Office of Naval Research (Oficina e Investigación Naval; ONR) fundada en mayo de 1945 cuyo propósito era crear un grupo de personal científico capacitado, que fuese más numeroso y que estuviese más adecuadamente preparado que el que existía antes de la guerra. Consistente con sus intenciones, la ONR apoyó generosamente investigaciones que en física iban desde la radioastronomía hasta la criogenia, pasando por la espectroscopía de microondas, la física del estado sólido, de altas energías y la nuclear. Y no fue la física la única favorecida, aunque sí la que más; la química, por ejemplo, fue objeto de bastante atención, como se puede deducir del hecho de que, en 1952, alrededor del 5 por ciento de los artículos publicados por revistas de química estadounidenses se basasen en investigaciones promovidas por la ONR. Cuando la ley que daba carácter permanente a la ONR fue aprobada por el Congreso, en agosto de 1946, esta agencia de la Marina ya mantenía 177 contratos con 81 laboratorios, totalizando 24 millones de dólares. En 1949, la ONR apoyaba 1.200 proyectos, que involucraban a 200 instituciones, 3.000 científicos y 2.500 estudiantes graduados. Para darse cuenta de lo que todo esto significaba solo hay que recordar que a finales de la década de los 30, el presupuesto anual total de los departamentos de física de todas las universidades de Estados Unidos era (no incluyendo salarios) de 750.000 dólares. Más información en Sánchez Ron (2007: 820-821).

[141]. Ver Weber (1961).

[142]. El segundo, GR2, se había celebrado en Francia: Royaumont, 21-27 de junio de 1959. Lichnerowicz y Tonnelat (que se había doctorado con Louis de Broglie) editaron las actas (Lichnerowicz y Tonnelat, eds. 1962). Las actas del GR3 aparecieron en 1964: Infeld, ed. (1964).

[143]. Citado en Preskill y Thorne (1995: xxvii).

[144]. Fueron Pauli y Markus Fierz (1939) quienes demostraron que el gravitón —suponiendo que existiese— debería tener espín 2.

[145]. El libro incluye dos valiosos ensayos: un prólogo de Preskill y Thorne (1995) y un estudio de Hatfield (1995), editor del volumen.

[146]. No parece que Laplace estuviese muy seguro de su hipótesis, ya que la

mantuvo únicamente en las dos primeras ediciones del libro. Para más detalles sobre las aportaciones de Michell y Laplace, véase Montgomery, Orchiston y Whittingham (2009).

[147]. Una valiosa aportación a la historia de la investigación en singularidades en relatividad general y cosmología se encuentra en Earman (1999).

[148]. La prioridad de Penrose la ha confirmado el propio Hawking: «La técnica crucial para investigar singularidades y agujeros negros, que fue introducida por Penrose, y que yo ayudé a desarrollar, era el estudio de la estructura causal global del espacio-tiempo» (Hawking 2011: 14). Aspectos de los enfoques matemático-geométricos que Penrose introdujo en el estudio de la relatividad general y que yo no trataré aquí, se analizan en Wright (2014).

[149]. Dennis Sciama (1926-1999) fue un físico británico (su director de tesis fue Dirac), especializado en relatividad y cosmología, que influyó mucho en el desarrollo del campo relativista, a pesar de que no llegase a ocupar ninguna cátedra, ni en Cambridge, ni en Oxford, donde se instaló finalmente, como fellow de All Souls, uno de los más selectos colleges de Oxford. La lista de sus doctorandos es impresionante; en ella figuran, entre otros, John Barrow, George Ellis, Gary Gibbons, Stephen Hawking, Martin Rees, David Deutsch y Brandon Carter. En la entrevista que le hizo Alan Lightman para el Center for History of Physics del American Institute of Physics, queda claro el papel que Sciama desempeñó en la carrera de Penrose. A la pregunta de Lightman de «¿En qué momento decidiste que podrías querer dedicarte a la física como opuesta a la matemática pura? ¿Realizaste esa elección?», Penrose respondió: «Mientras estudiaba la carrera y me especializaba en geometría durante el último curso, asistí a clases sobre teoría cuántica. Lo hice simplemente por diversión [...] Creo que cuando estuve en Cambridge como estudiante de investigación, en el fondo de mi mente todavía estaba interesado en la física. Y Dennis Sciama estimuló mucho mi interés. Trató de persuadirme diciendo: «¿Qué estás haciendo con esa matemática pura sin sentido? Ven y trabaja en física y cosmología». Siempre estaba diciéndome cosas de ese estilo. Y pienso que en alguna medida me persuadió, incluso aunque yo quería terminar lo que estaba haciendo. Además de todo esto, debo mencionar que en Cambridge fui a clases de física, no solo de matemática pura. Los dos cursos que encontré más inspiradores no fueron sobre matemática pura. Uno fue de Hermann Bondi, sobre relatividad general. Y el otro fue de Paul Dirac, sobre la teoría cuántica. En formas diferentes, fueron absolutamente bellos. Me influyeron más que cualquier otra cosa». «Oral

History Transcript. Dr. Roger Penrose. Interview by Alan Lightman», http://www.aip.org//history/ohilist/34322.html.

[150]. Se trata de un ejemplar mimeografiado, puesto que Penrose no lo publicó completo hasta que aparecieron sus Collected Papers (Penrose 2011); partes de él aparecieron en Penrose (1968).

[151]. Expresado en términos más técnicos, diré que al centrarse en la estructura en conos de luz del espacio-tiempo, se vio conducido a tratar con las ecuaciones de campos de masa cero; ambos, conos de luz y estos campos, son invariantes bajo transformaciones conformes (el grupo más general —más que el grupo de Lorentz— que preserva la forma de las ecuaciones del campo electromagnético de Maxwell).

[152]. Me he ocupado de Robb, de su personalidad, ideas y cómo estas fueron recibidas, en Sánchez Ron (2012: 100-105).

[153]. En su autobiografía, Hawking (2014: 78) reconoció este hecho: «El libro [The Large Scale Structure of Space-Time] se sigue imprimiendo porque es prácticamente lo último escrito sobre la estructura causal del espacio-tiempo, es decir, sobre qué polo del espacio-tiempo puede afectar a acontecimientos en otros puntos. Debo advertir al lector común que no intente consultarlo. Es muy técnico y se escribió en un momento en el que intentaba ser igual de riguroso que un matemático puro. Hoy en día me preocupa más tener razón que ser razonable». Esta confesión de Hawking proporciona una dimensión más amplia que la puramente personal: efectivamente, hubo un largo periodo en el que la física de agujeros negros-singularidades se distinguía con dificultad de un apartado matemático. Aquella fue, no obstante, una fase seguramente necesaria, que terminó dejando paso a otra más «física», esto es, más conectada con, e interesada por, los aspectos físicos (como la propia existencia de los agujeros negros).

[154]. Citado en Sánchez Ron (1993: 14-15).

[155]. La referencia a la teoría de Brans-Dicke hay que entenderla desde la perspectiva de que, en la década de 1960 y principios de la de 1970, era considerada como una posible alternativa a la relatividad general, una posibilidad que hace mucho se abandonó. Ver Brans y Dicke (1961).

[156]. Citado en Belfer (2014: 81), donde se estudian los trabajos de Bekenstein

en este campo.

[157]. El debate entre Hawking y Bekenstein se trata, dentro de un contexto más amplio, en Susskind (2009). Ver, asimismo, Thorne (1995).

[158]. Zeldovich fue una figura muy destacada de la física no solo soviética, sino mundial. Es posible hacerse una idea de sus múltiples intereses y logros en Sunyaev, ed. (2004).

[159]. En realidad, hay que ser cuidadoso a la hora de asignar el crédito por esta idea. Aunque fue Einstein quien la publicó, lo hizo a instancias de un científico aficionado de origen checo pero afincado en Estados Unidos, Rudi W. Mandl, al que se le había ocurrido la idea de las lentes gravitacionales y que insistió a Einstein hasta que este publicó y defendió la idea, aunque señalando que «no existen grandes posibilidades de observar este fenómeno». Lo curioso es que, como han demostrado Jürgen Renn y Tilman Sauer (2003), Einstein había considerado la misma idea en una fecha tan temprana como 1912, realizando esencialmente los mismos cálculos que un cuarto de siglo después llevó a cabo tras la insistencia de Mandl, aunque no llegase entonces a publicarlos. Obviamente, había olvidado sus antiguas reflexiones. Y la historia no termina aquí, ya que resulta que también llegaron a la misma idea, antes de 1936, publicándola, Arthur Eddington (1920: 133-135) y el físico ruso Orest Chwolson (1924). Ver, asimismo, Renn, Sauer y Stachel (1997). Los pasajes pertinentes de estos trabajos, junto con otros documentos, se reproducen en Renn y Sauer, (2000).

[160]. La historia de cómo se planeó y llegó a construirse este telescopio, se narra en Smith (1989, 1992).

[161]. En 1946, Spitzer preparó un informe clasificado en el que proponía un telescopio espacial. Destacaba que las ventajas de semejante telescopio eran claras: las imágenes que tomase no sufrirían la absorción de la atmósfera, ni tampoco se producirían centelleos debidos a las variaciones atmosféricas.

[162]. Un detector digital convierte la luz incidente en señales eléctricas, en lugar de oscurecer los granos de una placa fotográfica. Esas señales eléctricas se pueden digitalizar y almacenar en una computadora, donde no es difícil manipular los datos para los fines que se deseen; por ejemplo, si se conoce que la imagen de una galaxia distante está parcialmente mezclada con la luz de una

estrella que se encuentra en un plano más cercano, es posible establecer un programa en la computadora que sustraiga electrónicamente la luz no deseada y obtener de esta manera una imagen más nítida de la galaxia.

[163]. El que aparezca RCA no debe extrañar: estas tecnologías derivaron, en gran medida, de desarrollos que se produjeron en la industria de la televisión. También fueron importantes los trabajos que se llevaron a cabo en el ámbito militar para producir instrumentos muy sensibles; por ejemplo, capaces de detectar imágenes de poca intensidad.

[164]. Para más información acerca de estas tecnologías, y otras relacionadas (como el CCD: Charge-Coupled Device), véase McLean (1997) y Longair (2006: 163-165).

[165]. Dirac desarrolló la teoría de los monopolos magnéticos más tarde, en 1948 (Dirac 1948).

[166]. Este Blas Cabrera es hijo del físico español Nicolás Cabrera (1913-1989) y nieto del también físico español Blas Cabrera y Felipe (1878-1945), la principal figura en la regeneración que la física española experimentó durante el primer tercio del siglo XX. Blas Cabrera y Felipe pasó la guerra civil española (1936-1939) exiliado en París; al término de la contienda el régimen franquista no le permitió regresar a España, lo que le llevó a instalarse en México, donde falleció. Esta situación explica, al menos en parte, que Nicolás desarrollase una buena parte de su carrera en Estados Unidos (en la Universidad de Virginia), donde nació, estudió y ha ejercido su carrera como físico (en la Universidad de Stanford) su hijo Blas. Posteriormente, en 1971, Nicolás Cabrera regresó a España, donde fundó la División de Física de la Universidad Autónoma de Madrid, universidad que había sido creada poco antes, en 1968.

[167]. En una transición de fase tiene lugar un cambio repentino en el estado del sistema en cuestión. Un ejemplo es cuando el agua (líquida) se convierte en hielo (sólido).

[168]. La génesis y desarrollo de las ideas de Linde se explican, por él mismo, en Lightman y Brawer 1990: 483-494).

[169]. Especialmente después del descubrimiento de la expansión del Universo por Hubble, y del establecimiento de la teoría del Big Bang, la cosmología ha sido un tema de interés para la Iglesia Católica. El simposio al que me estoy

refiriendo constituye buena prueba de ello: fue inaugurado por el papa Juan Pablo II, quien en su discurso de bienvenida manifestó (Juan Pablo II 1982: xxviii-xxix): «La cosmogonía y la cosmología han suscitado siempre un gran interés entre los pueblos y las religiones. La propia Biblia nos habla del origen del Universo y de su constitución, no para suministrarnos un tratado científico sino para precisar las justas relaciones del hombre con Dios y con el Universo. La Santa Escritura simplemente quiere declarar que el mundo ha sido creado por Dios, y para enseñar esta verdad debe expresarse con los términos de la cosmología al uso en el tiempo en que fue escrita. El libro sagrado quiere, por otra parte, hacer saber a los hombres que el mundo no ha sido creado como albergue de dioses, como enseñan otras cosmogonías y cosmologías, sino que ha sido creado para el servicio del hombre y a la gloria de Dios [...] Toda hipótesis científica sobre el origen del mundo, como la de un átomo primitivo del que derivaría el conjunto del Universo físico, deja abierto el problema relativo al comienzo del Universo. Por ella misma, la ciencia no puede resolver semejante cuestión: es preciso hacer saber al hombre que tal cuestión se eleva por encima de la física y de la astrofísica y que se necesita la metafísica; es preciso sobre todo hacerle saber que proviene de la revelación de Dios. Hace treinta años, refiriéndose al problema del origen del Universo durante la Semana de estudios sobre el problema de los micro-seísmos organizada por la Academia Pontificia de Ciencias, el 22 de noviembre de 1951, mi predecesor, el papa Pio XII, se expresó de la siguiente manera: "En vano se alcanzará una respuesta a partir de las ciencias de la naturaleza, que, al contrario, declaran lealmente encontrarse delante de un enigma irresoluble. Es igualmente cierto que el espíritu humano versado en la meditación filosófica penetra más profundamente en el problema. No se puede negar que un espíritu clarividente y enriquecido por los conocimientos científicos modernos, y que encara con serenidad este problema, se ve conducido a romper el círculo de una manera totalmente independiente y autónoma [...] y a remontarse hasta un Espíritu creador. Con la misma mirada límpida y crítica con la que examina y juzga los hechos, ha entrevisto y reconocido la obra de la Potencia Total creadora, cuya virtud, suscitada por la potencia fiat pronunciada hace miles de millones de años por el Espíritu creador, se ha manifestado en el Universo, llamando a la existencia, en gesto de generoso amor, de la materia desbordante de energía"». Mucho había cambiado, es cierto, la dialéctica de la jerarquía católica desde los tiempos de Galileo, pero no la vaciedad de su discurso. Me pregunto qué pensarían al menos algunos de los asistentes a aquel simposio cuando escucharon al papa polaco; científicos como Stephen Hawking o Steven Weinberg (1977 a, 1996: 216), que escribió al final del último capítulo de su libro The First Three Minutes lo siguiente: «Para los

seres humanos, es casi irresistible el creer que tenemos alguna relación especial con el Universo, que la vía humana no es solamente el resultado más o menos absurdo de una cadena de accidentes que se remonta a los tres primeros minutos, sino que de algún modo formamos parte de él desde el comienzo. Mientras escribo estas líneas, viajo en un avión a diez mil metros de altura, por encima de Wyoming, en viaje de vuelta de San Francisco a Boston. Debajo, la Tierra parece muy suave y confortable, salpicada de vaporosas nubes, con nieve que adquiere una tonalidad rosada a medida que el Sol se pone y caminos se extienden en línea recta por el campo de una ciudad a otra. Es difícil darse cuenta de que todo esto solo es una minúscula parte de un universo abrumadoramente hostil. Aún más difícil es comprender que este Universo actual ha evolucionado desde una condición primitiva inefablemente extraña, y tiene ante sí una futura extinción en el frío eterno o el calor intolerable. Cuanto más comprensible parece el Universo, tanto más sin sentido parece también».

[170]. Doctor por la Universidad de Chicago en 1964, con nada más y nada menos que Subrahmanyan Chandrasekhar como director de tesis, la carrera científica de Ostriker, catedrático de Astrofísica en la Universidad de Princeton, ha sido espléndida, cubriendo un rango de intereses muy variados: origen y evolución de galaxias, agujeros negros, estrellas de neutrones o la estructura a gran escala del Universo.

[171]. He tomado esta imagen de Thorne (1995: 456). Para las ideas de Wheeler, ver Wheeler (1960, 1962: 69-73); la sección correspondiente se titula «El espacio, asiento de violentas perturbaciones de acuerdo con la electrodinámica cuántica».

[172]. Por sus trabajos ambos recibieron el Premio Nobel de Física de 2006.

[173]. Más detalles en Ostriker y Mitton (2014).

[174]. Otra evidencia de la existencia de la materia oscura procede de galaxias en forma de disco (como nuestra propia Vía Láctea) que se encuentran en rotación: si miramos a la parte exterior de estas galaxias, encontramos que el gas se mueve de manera sorprendentemente rápida; mucho más rápidamente de lo que debería debido a la atracción gravitacional producida por las estrellas y gases que detectamos en su interior.

[175]. Ver, por ejemplo, los comentarios que sobre este punto ha hecho Saul

Perlmutter (2003: 57-58) así como Weinberg (1989).

[176]. Para más detalles acerca de los descubrimientos de Wolszczan y Frail, y Mayor y Queloz, véase Walker (2003).

[177]. El Observatorio de Arecibo nació de una idea de William E. Gordon, entonces profesor de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Cornell. El interés de Gordon era la ionosfera, la región de la atmósfera que se encuentra a unos 80 kilómetros de la superficie terrestre. A esa altitud la radiación ultravioleta de alta energía y los fotones de los rayos X llegan procedentes del Sol e interaccionan con los gases atmosféricos creando un plasma de electrones y de iones cargados positivamente. Cuando una onda de radio de gran potencia se transmite hacia la ionosfera, una parte muy pequeña es reflejada por los electrones. Si se estudia esa radiación reflejada es posible obtener información acerca de la temperatura y densidad de los electrones ionosféricos, composición iónica o vientos ionosféricos. Según Gordon, para conseguir esa información se necesitaba una antena de las dimensiones de la que se construyó en Arecibo. Sobre el observatorio de Arecibo, ver Altschuler y Salter (2013).

[178]. Una partícula α es, recordemos, un núcleo de helio.

[179]. Recordemos que 1 keV= 1.000 eV, donde 1 electronvoltio, eV, es la unidad de energía que representa la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio.

[180]. Sobre Lawrence y su laboratorio, véase Heilbron y Seidel (1989).

[181]. La vida y obra de Wideröe se estudian en Waloschek (1994).

[182]. El concepto de «resonancia magnética» fue publicado (sin haber sido comprobado experimentalmente) en una breve nota de Lawrence y Niels E. Edlefsen (1930).

[183]. Urey, Brickwedde y Murphy (1932). El deuterio tiene un núcleo con un protón y un neutrón; el hidrógeno normal solo tiene un protón.

[184]. En este punto es relevante citar lo que escribió uno de los principales líderes de la física de altas energías estadounidenses, Wolfgang Panofsky (2007: 22): «El Radiation Laboratory de la Universidad de California fue pionero en lo que ahora se denomina generalmente Big Science. Como director, Lawrence

tomaría decisiones que no se cuestionaban. Antes de la guerra, Lawrence había tenido mucho éxito en atraer financiación de fuentes privadas y fundaciones; después de la guerra, en parte como reconocimiento de su liderazgo en el proyecto de separación electromagnética [de los isótopos 235 y 238 del uranio], el gobierno apoyó su laboratorio con generosidad».

[185]. Hay que señalar que aunque fuese la física nuclear la más favorecida, el apoyo militar también se manifestó en otras ciencias; las del espacio, por ejemplo, se beneficiaron enormemente de la colaboración con los militares. Con los misiles V-2 capturados a los alemanes se llevaron a cabo, entre 1946 y 1956, importantes investigaciones en rayos cósmicos, meteorología, y física de la ionosfera, atmosférica y solar. Evidentemente, tales investigaciones formaban parte de un conjunto en el que no faltaban aspectos más aplicados, como propagación de ondas radio en la ionosfera, reconocimiento aéreo, dinámica de vuelo, control de misiles, etc., pero el hecho es que la física y un buen número de ramas de la ingeniería avanzaron notablemente con dicha asociación.

[186] . La principal reacción de fusión que tiene lugar en la bomba de hidrógeno es la siguiente (H2 = deuterio; H3 = tritio; He4 = núcleo de helio-partícula alfa; n = neutrón):

$$H3+H2 \rightarrow He4+n1+17{,}6\ MeV$$

La energía de fusión de 1 kilogramo de deuterio es suficiente como para elevar a 600 barcos, de 50.000 toneladas, a 1 kilómetro de altura.

[187]. En un seminario sobre la teoría de la bomba atómica, celebrado en julio de 1942, Teller aventuró la posibilidad de que se pudiera utilizar una bomba de fisión como detonante de otra de fusión. En 1944 defendía la idea de que sería posible fabricar una bomba de implosión que utilizase deuterio y tritio como combustible. Los soviéticos se habían embarcado en el proyecto en 1948.

[188]. Para entender mejor la situación reinante en aquel momento, además de las relaciones de Estados Unidos con la Unión Soviética hay que tener en cuenta también que en 1949 los comunistas se hacían con el poder en China, bajo el liderazgo de Mao Tse Tung. Estos acontecimientos llevaron al Consejo de Seguridad Nacional estadounidense a defender la tesis de que Estados Unidos se enfrentaba a un periodo de máximo peligro, y que para su seguridad debía

procederse a un completo rearme, recomendando al presidente que se aprobase un presupuesto de entre 100 y 200 millones de dólares para la fabricación de la superbomba.

[189]. Aunque tanto neutrón como antineutrón tienen la misma carga eléctrica (cero), poseen otras propiedades «elementales» opuestas: el neutrón tiene número bariónico +1, mientras que el del antineutrón es −1. Esto se debe a que el antineutrón se compone de antiquarks, mientras que los neutrones están formados por quarks (trataré de los quarks más adelante). El «número bariónico» es una propiedad invariante de las partículas que se puede definir como un tercio del número de quarks menos el número de antiquarks dentro del sistema (partícula).

[190]. Estos tipos diferían en las combinaciones de campos magnéticos y eléctricos, tipo de partículas a acelerar, geometría de las órbitas de las partículas y frecuencia del campo acelerador.

[191]. La historia de este acelerador se menciona en varias fuentes; una especialmente documentada es Wang (1995).

[192]. La historia del Fermilab se detalla en Hoddeson, Kolb y Westfall (2008).

[193]. He tratado de estos y otros asuntos que siguen en Sánchez Ron (2010: cap. 5).

[194]. Andrew Goodpaster, general de brigada, era el secretario de personal de Eisenhower; W. Persons, general retirado, era el ayudante de Eisenhower y el jefe administrativo de Kistiakowsky; Elmer B. Staats era el director ejecutivo (deputy director) del Bureau of the Budget (Oficina de Presupuestos).

[195]. Maurice H. Stans era director del Bureau of the Budget.

[196]. El descubrimiento del Strong Focussing se explica en Livingston (1969: 60-75).

[197]. No se debe pensar que los del CERN fueron los únicos aceleradores que existieron en Europa. Dejando aparte los soviéticos, merece destacar el Deutsches Elektronen-Synkhrotron (DESY) de Hamburgo.

[198]. En 1967, España decidió —por razones, entre otras, de presupuesto—

abandonar el CERN, salida que se hizo efectiva en 1968. En 1982, ya bajo otro régimen político, se reintegró a él. Véase, en este sentido, Romero de Pablos y Sánchez Ron (2001: 203-230).

[199]. Sobre la creación del CERN, véase Hermann, Krige, Mersits y Pestre (1987, 1990). Esta historia del CERN se completa en Krige, ed. (1996).

[200]. Otros ejemplos, posteriores al CERN, de colaboración europea, de los que no trato aquí, son la European Atomic Energy Community (EURATOM), creada en 1957 por Bélgica, Francia, Holanda, Italia, Luxemburgo y la República Federal Alemana; la European Research Organization (ESRO; a partir de 1975, European Space Agency, ESA), establecida la Convención en 1962, se implementó en 1964, con España uno de los países fundadores; el European Molecular Biology Laboratory (EMBL, 1973); y el Joint European Torus (JET, 1977).

[201]. Aun así, en 1959 Francis Farley, Georges Charpak, Théo Müller, Antonino Zichichi, Johannes Cornelius Sens y Richard Garwin lo utilizaron para tomar la primera medida directa del momento anómalo del muón con una precisión del 2 por ciento, que en 1962 se rebajó al 0,4 por ciento, un resultado que apoyaba a la electrodinámica cuántica. Los detalles que siguen sobre los aceleradores del CERN constituyen apenas una muestra superficial de lo que constituye una compleja historia. Me he basado en la más completa historia (CERN 2008).

[202]. También en Europa surgieron, no mucho después de la reconversión programática de la National Science Foundation, iniciativas en el sentido de favorecer la dimensión «tecnológica» frente a la «científica», de instituciones dedicadas a la investigación. Así ocurrió con la European Space Research Organization (ESRO), institución creada en 1964, que inicialmente fue diseñada —siguiendo en parte el modelo de la NASA— como una institución dedicada preferentemente a la ciencia y no a la técnica del espacio. Pero la dinámica de los intereses políticos, no los científicos, condujo a una situación de crisis que llevó a que ESRO se convirtiese en 1975 en la European Space Agency (ESA), en la que la tecnología espacial figuraba dentro de sus objetivos. Explicada brevemente, la crisis de ESRO surgió cuando algunos países miembros, encabezados por Francia, mostraron su interés en el campo de las telecomunicaciones vía satélite. El gobierno gaullista francés no veía con buenos ojos la dominación estadounidense en este campo, estando, además, interesado

en avanzar en el dominio de los lanzadores (cohetes para transportar los satélites). Por razones más tecnológicas que políticas (deseaban mejorar su know-how industrial en este campo), la República Federal Alemana y Bélgica también se mostraron interesadas en entrar en esa área, que, sin embargo, era ajena al dominio de intereses, científicos, de ESRO. Estas tres naciones argumentaron que era preciso modificar las actividades de la organización, pasando a centrarlas en las telecomunicaciones vía satélite. A finales de 1970, Francia (seguida de Dinamarca) denunciaba la Convención de ESRO. Su retirada debería hacerse efectiva el 31 de diciembre de 1971, si no se alcanzaba un acuerdo que condujese a un nuevo diseño en la orientación del programa de ESRO, que favoreciese a las aplicaciones. El resultado final del paso dado por Francia fue la creación, entre 1973 y 1975, de ESA, organización cuyo presupuesto para la investigación puramente científica se limita al diez por ciento del presupuesto total, aunque, eso sí, es obligatorio implementarlo lo que no ocurre con el resto de sus programas, que son optativos.

[203]. Sigo aquí el lúcido análisis de Daniel Kevles (1997).

[204]. A pesar de lo que decía Weinberg, Clinton apoyó al SSC. En una carta que envió el 16 de junio de 1993 al congresista William H. Natcher, manifestaba (US Government Office): «Como su Comité considera los presupuestos para Energía y Agua correspondientes al Año Fiscal de 1994, quiero que conozca mi continuo apoyo al Superconducting Super Collider [...] Abandonar el SSC en este punto significaría que Estados Unidos está comprometiendo su posición de liderazgo en ciencia básica, una posición no cuestionada en generaciones. Estos son tiempos difíciles, pero nuestra Administración apoya este proyecto como parte de su extensa inversión en ciencia y tecnología [...] Le pido que apoye este importante y retador esfuerzo».

[205]. Se puede encontrar más información en Physique des Particules (1982), Nambu (1985), Brown y Hoddeson, eds. (1983), Brown, Dresden y Hoddeson, eds. (1989), Crease y Mann (1996), Hoddeson, Brown, Riordan y Dresden, eds. (1997), Fraser, ed. (1998), Watson (2004), Ynduráin (2006) y Brandt (2009).

[206]. Mirando hacia atrás en el tiempo, en un librito dedicado a explicar al público los aceleradores, William Kernan (1968: 46) desarrollaba bien esta idea: «Hace solo unos años era posible establecer una lista de alrededor de 30 partículas subatómicas que se consideraban "fundamentales", esto es, que no podían ser explicadas como simples compuestos de otras. Sin embargo, en los

últimos años se han observado otros 60 o 70 objetos subatómicos, en experimentos que utilizan las altas energías y los haces de alta intensidad disponibles con los nuevos aceleradores. Llamar a estos objetos "partículas fundamentales" parecería dar una imagen muy complicada de la naturaleza, de manera que los físicos han buscado diligentemente principios simplificadores».

[207]. La biografía de Ne'eman (1925-2006) es interesante y peculiar. Mientras estudiaba ingeniería mecánica en Tel Aviv, se unió, a la edad de 15 años, a la Haganá, la organización paramilitar judía (entonces Palestina estaba bajo mandato británico). En la guerra árabe-israelí de 1948, Ne'eman sirvió en las Fuerzas Aéreas de Israel, ocupando diversos puestos. Después (1952-1954) ocupó cargos importantes en el Departamento de Operaciones del Alto Estado Mayor (fue el responsable del primer borrador de la doctrina de defensa israelí). Entre 1958 y 1960, Ne'eman fue agregado militar en la embajada de Israel en el Reino Unido, circunstancia que aprovechó para convertirse en doctorando de Abdus Salam en el Imperial College de Londres. En 1961, cuando fue desmovilizado, se dedicó de lleno a la física. A partir de 1965, fue catedrático de Física en la Universidad de Tel Aviv. Existe una amplia recopilación de artículos que tratan del Eightfold way: Gell-Mann y Ne'eman (1964).

[208]. Los hadrones pueden ser de dos tipos: bariones (protones, neutrones e hiperones) y mesones (partículas cuyas masas tienen valores entre la del electrón y la del protón).

[209]. Para las visiones de Gell-Mann y Zweig de cómo llegaron a su descubrimiento, ver Gell-Mann (1995, 1997), Zweig (1980, 2010).

[210]. Es también interesante citar lo que Gell-Mann (1995: 198) ha señalado a propósito del nombre quark: «En 1963, cuando bauticé con el nombre de "quark" a los constituyentes elementales de los nucleones, partí de un sonido que no se escribía de esa forma, algo parecido a "cuorc". Entonces, en una de mis lecturas ocasionales de Finnegans Wake, de James Joyce, descubrí la palabra "quark" en la frase "Tres quarks para Muster Mark". Dado que "quark" (que se aplica más que nada al grito de una gaviota) estaba para rimar con "Mark", tenía que buscar alguna excusa para pronunciarlo como "cuorc". Pero el libro narra los sueños de un tabernero llamado Humphrey Chipden Earkwicker. Las palabras del texto suelen proceder simultáneamente de varias fuentes, como las "palabras híbridas" en A través del espejo, de Lewis Carroll. De vez en cuando aparecen frases parcialmente determinadas por la jerga de los bares. Razoné, por tanto,

que tal vez una de las fuentes de la expresión "Tres quarks para Muster Mark" podría ser "Tres cuartos para Mister Mark" (cuarto en inglés es quart) en cuyo caso la pronunciación "cuorc" no estaría totalmente injustificada. En cualquier caso, el número tres encaja perfectamente con el número de quarks presentes en la naturaleza».

[211]. Los tres compartieron el Premio Nobel de Física de 2004. Ver la descripción que Gross (1997) hizo del descubrimiento.

[212]. Véase también Reines (1989).

[213]. Tanto el reactor de Hanford como el de Savannah se construyeron para proporcionar materiales para bombas, en la época de los experimentos de Reines y Cowan, especialmente para la bomba de hidrógeno.

[214]. Bruno Pontecorvo (1913-1993) fue un físico en el que es interesante detenerse. Aquí solamente diré que formó parte del grupo de Fermi en Roma, tras lo cual pasó (1936) a París, donde trabajó con Irène y Frédéric Joliot-Curie. Allí se hizo socialista, ideas de las que también participaban los Curie. Aunque estaba en sus planes regresar a Italia, no lo hizo debido a la discriminación racial contra los judíos que implementó el régimen de Mussolini (por esta misma razón, Fermi, cuya esposa era de origen judío, emigró a Estados Unidos). Permaneció en París hasta la llegada de los alemanes, lo que le obligó a desplazarse a Estados Unidos, primero, y a Canadá después (1943), donde trabajó en diseño de reactores, rayos cósmicos, neutrinos y desintegración de muones. Gracias a la experiencia que acumuló en el diseño de reactores durante su estancia en Canadá, en 1948 fue nombrado senior principal scientific officer (principal oficial científico senior) en el proyecto atómico británico (él no había participado en el Proyecto Manhattan), puesto desde el que contribuyó al establecimiento de Harwell, el centro de investigaciones nucleares del Reino Unido. En marzo de 1950, Klaus Fuch, que dirigía la unidad de Harwell en la que trabajaba Pontecorvo, fue arrestado acusado de espionaje para los soviéticos. El mismo mes, aparecieron evidencias de que familiares de Pontecorvo eran comunistas, lo que condujo a que se le invitase a abandonar Harwell. Entonces Pontecorvo, que acababa de ser designado catedrático de Física en la Universidad de Liverpool, puesto del que debería tomar posesión en enero de 1951, abandonó Inglaterra, instalándose en la Unión Soviética. Ver Turchetti (2012).

[215]. Obsérvese que en la reacción que sigue aparece un neutrino electrónico, νe. No he tenido oportunidad de referirme a que existen neutrinos de tres tipos: uno asociado al electrón, νe, otro al muón, el neutrino muónico, νμ, y un tercero (difícilmente distinguible de los dos anteriores) a la partícula tau, neutrino tauónico, ντ. La posibilidad de existencia del neutrino muónico fue apuntada en 1949 por Jack Steinberger (1949) y demostrada (más concretamente, que el neutrino muónico es diferente del electrónico) en el acelerador AGS de Brookhaven por Gordon Danby, Jean-Marc Gaillard, Kostantin Goulianos, Leon Lederman, Nathan Mistry, Melvin Schwartz y Jack Steinberger (1962). Por este descubrimiento, los líderes del grupo, Lederman, Schwartz y Steinberger, recibieron el Premio Nobel de Física en 1988. El neutrino tauónico se dedujo de una serie de experimentos, entre 1974 y 1977, por el grupo que trabajaba con los aceleradores de Stanford y Berkeley dirigido por Martin Lewis Perl (Perl et al. 1975).

[216]. Mientras que Weyl introdujo la teoría de grupos en la mecánica cuántica imponiendo un abstracto aparato matemático extraído directamente de los trabajos matemáticos de Isaii Schur (1875-1941) y de él mismo, Wigner los introdujo a partir del estudio de las simetrías en cristales.

[217]. Además de Pauli (que no tardaría en convertirse él mismo en miembro destacado de ese «apestoso grupo»), otros a los que desagradaba este formalismo matemático eran Max von Laue, Erwin Schrödinger y Max Born.

[218]. Sin embargo, estos trabajos de Noether fueron recibidos con entusiasmo por Albert Einstein, que el 24 de mayo de 1918 escribía a David Hilbert, bajo cuya tutela estaba Noether en Gotinga: «Ayer recibí un artículo muy interesante de la Srta. Noether sobre la generación de invariantes. Me impresiona que estas cosas puedan ser tratadas desde un punto de vista tan general». Y añadía: «No habría hecho daño a la vieja guardia de Gotinga que se hubiese enviado a la Srta. Noether para que les diese clase». Unos meses más tarde, el 27 de diciembre, tras recibir el segundo artículo de Noether, repetía su admiración por ella, que como mujer era rechazada por los claustros universitarios, en una carta a Felix Klein: «Lo que me incita a escribirle hoy es un asunto diferente. Al recibir el nuevo artículo de la Srta. Noether, he vuelto a sentir la gran injusticia que es el que le sea negada la venia legendi. Yo apoyaría fuertemente el que se tomasen medidas de presión en el Ministerio» (Schulmann, Kox, Janssen e Illy, eds. 1998: 774, 976). Desgraciadamente, como tantos otros alemanes de origen judío, Noether tuvo que abandonar Alemania: emigró en 1933 a Estados Unidos, donde

enseñó en el Bryn Mawr College. Falleció en 1935, como consecuencia de una infección tras una operación a la que fue sometida. Las contribuciones de Noether se estudian en Kosman-Schwarzbach (2004) y Rowe (1999).

[219]. Una buena exposición de la relación entre leyes de conservación e invariancias, se encuentra en Havas (1973).

[220]. Weyl denominó primero su idea «Masstab Invarianz», luego «Eich Invarianz». En España, se ha intentado utilizar otros términos, como «aforo», «calibre», «contraste» o «escala», en lugar de gauge, pero en el ámbito de la física de las partículas no han prosperado. Sí está aceptada «invariancia de norma» en otras áreas de la física y, también, en otros países de habla hispana, México entre ellos.

[221]. Citado en O'Raifeartaigh (1997: 108).

[222]. Como apoyo a esto, citaré a Roger Penrose (2000: 222): «También es fundamental para la moderna teoría de campos y la física de partículas la idea de una "conexión gauge" [...] que surgió de las tempranas ideas de Weyl acerca de cómo incorporar el electromagnetismo en el esquema de la teoría general de la relatividad de Einstein. El actual "modelo estándar" de la física de partículas depende fuertemente de la noción de una conexión gauge (o campo de Yang-Mills), y este modelo ha sido bien ajustado, de manera que ahora concuerda muy bien con los datos experimentales». Y añadía: «Sin embargo, contiene demasiados parámetros numéricos (17, o más) y otros rasgos aparentemente arbitrarios, y estaría bien saber qué principios subyacentes son responsables de determinarlos». Es interesante consultar un artículo en el que Yang (1986) trató de las contribuciones de Weyl a la física.

[223]. Ver Von Meyenn (1987).

[224]. El trabajo de su director de tesis al que se refería es Schwinger (1957).

[225]. El papel de la invariancia gauge como modelo de unificación, se trata desde el punto de vista de la historia de la ciencia en Cat (1998: 280-284).

[226]. En realidad, el trabajo de Salam fue en colaboración con John Clive Ward, pero publicó el resultado solo bajo su nombre, aunque señalando que «Ward y yo trabajamos en estas ideas intermitentemente [...] Con posterioridad, yo descubrí que un desarrollo casi idéntico había sido realizado por Weinberg,

que aparentemente tampoco conocía el trabajo de Ward y mío».

[227]. 'T Hooft había sido discípulo de Veltman y utilizó técnicas matemáticas desarrolladas por este.

[228]. Sobre el contexto de este descubrimiento —el LHC y lo que se esperaba de él—, véase Giudice (2010).

[229]. No hay consenso acerca del por qué de la letra «M». Unos opinan que es por «Teoría Madre», otros «Teoría del Misterio», «Teoría de la Membrana» o «Teoría Matriz».

[230]. Para más información, favorablemente predispuesta, sobre la teoría de cuerdas y supercuerdas, véase Witten 203, Gross 2003, Townsend 2003y Green 2003.

[231]. Por estos trabajos, Bethe recibió el Premio Nobel de Física de 1967.

[232]. Fowler obtuvo el Premio Nobel de Física de 1983 por «sus estudios teóricos y experimentales de las reacciones nucleares de importancia en la formación de los elementos químicos del Universo». Lo compartió con Chandrasekhar, quien lo recibió por «estudios teóricos de los procesos físicos de importancia en la estructura y evolución de las estrellas». Es sorprendente que Hoyle, que inició muchos de estos trabajos, quedase al margen de la decisión de la Academia Sueca (la única explicación verosímil es que jugase en contra de él su personalidad, a veces polémica, y que continuase apoyando la cosmología del estado estacionario).

[233]. En su conferencia Nobel (Bethe 1968, 1991: 245-264). Por supuesto, posteriormente se introdujeron novedades.

[234]. De todas maneras, también se pueden dar algunas reacciones interesantes con alguno de estos elementos. Una de ellas es la siguiente: dos núcleos de helio chocan y forman un átomo de berilio. En realidad se produce más de un tipo de berilio; uno de ellos, el isótopo de peso atómico 8 es muy radiactivo, existiendo durante apenas una diezmilbillonésima de segundo, tras lo cual se desintegra produciendo de nuevo dos núcleos de helio. Pero, si durante ese instante de vida, el berilio choca con un tercer núcleo de helio puede formar un núcleo de carbono (número atómico 6 y peso atómico 12), que es estable.

[235]. Ya nos ha aparecido el artículo en el que se anunciaba el descubrimiento de los bosones W+, W- y Z, que firmaban 125 científicos (Arnison et al. 1983). Otro ejemplo en el mismo sentido, es el, importante, artículo sobre la observación de modos de desintegración de mesones B con sabor: Behrends et al. (1983), donde el et al. que por economía utilizo esconde los nombres de 78 investigadores, de un conjunto de 8 instituciones (universidades de Estados Unidos). Y se trata de un artículo que ocupó solo 4 páginas de Physical Review Letters.

[236]. Aunque no en la dirección a la que apunto aquí, son valiosas las contribuciones de Jessica Wang (2012) para el caso de Merle Tuve y la Guerra Fría, y la más general es de Paul Forman (1991).

[237]. Citaré, en el idioma en que fueron escritas, las frases completas de Oppenheimer: «In some sort of crude sense which no vulgarity, no humor, no over-statement can quite extinguish, the physicists have known sin, and this is a knowledge which they cannot lose».

[238]. Citado en Bernstein (1988: 263).

[239]. Sobre este juicio, ver Sánchez Ron (2007 a: 811-815).

[240]. Bohr (1935) respondió inmediatamente a Einstein, Podolsky y Rosen con un artículo del mismo título, pero su respuesta no es demasiado relevante para mi discusión.

[241]. La biografía de David Bohm (1917-1992) es lo suficientemente interesante como para dedicarle unas líneas. Estadounidense de nacimiento, cuando en 1943 completó su tesis doctoral (en Berkeley), era considerado como uno de los físicos teóricos más prometedores de su generación. Los años de la Segunda Guerra Mundial los pasó en Berkeley (aunque el general Groves no le autorizó a participar en el Proyecto Manhattan), y al término de la contienda pasó a Princeton como profesor ayudante. Después de haber investigado en la física de los plasmas y haber publicado un libro de texto muy bien recibido, Quantum Theory (1951), este mismo año, el Comité de Actividades Antiamericanas (House Un-American Activities Committee) del Congreso le convocó para tratar de sus actividades y relaciones con el Partido Comunista durante la guerra, en el Laboratorio de Radiación de Berkeley. Se acogió entonces a la Quinta Enmienda, que protege contra la autoincriminación. No

obstante, fue arrestado, encarcelado, puesto en libertad condicional y finalmente juzgado por un tribunal (31 de mayo de 1951). Salió judicialmente indemne gracias a una resolución del Tribunal Supremo, que había confirmado la posibilidad de utilizar la Quinta Enmienda en casos como el suyo. Sin embargo, la Universidad de Princeton le dio un permiso de ausencia por el tiempo que le quedaba de contrato, no renovándoselo cuando expiró. Emigró entonces a Brasil, donde encontró trabajo (como Estados Unidos le retuvo el pasaporte, tuvo que adoptar la nacionalidad brasileña). Pero no se encontraba a gusto en Brasil y, en enero de 1955, aceptó un puesto en el Technion de Haifa (Israel); dos años después se trasladó a Inglaterra, donde obtuvo finalmente una cátedra en el Birkbeck College de Londres, donde pasó el resto de su carrera, centrada sobre todo en versiones causales de la mecánica cuántica y en otros enfoques no convencionales de la física. Le recuerdo, un hombre pacífico, profundo y considerado, en su despacho de Birkbeck, al que me había llevado, para que le conociese, mi director de tesis, Sigurd Zienau. Más información sobre Bohm en Freire, jr. (2005), Olwell (1999) y Kojevnikov (2002).

[242]. Sigo aquí detalles de la biografía de Bell incluidos en Jackiw y Shimony (2002).

[243]. Para más información sobre estas complejas cuestiones, consultar Whitaker (2012), Aczel (2002), Gilder (2008), Zeelinger (1999) y Galindo (2009).

[244]. Everett a Bryce DeWitt, 31 de mayo de 1957; carta reproducida en Barret y Byrne, eds. (2012: 255).

[245]. Este artículo apareció en un número de Reviews of Modern Physics que contenía trabajos de participantes en la reunión (el congreso GR1) celebrada en la Universidad de North Carolina, Chapel Hill, del 18 al 23 de enero de 1957, a la que ya me referí en el capítulo segundo. Como editor del volumen, los manuscritos se enviaron a Bryce DeWitt; entre los que recibió se encontraba el trabajo de Everett, aunque él no había participado en el congreso. DeWitt explicó las circunstancias de su publicación de la siguiente manera (reproducido en DeWitt-Morette (2011: 94): «Uno de los artículos que recibí fue "Relative State". Aunque Everett no había participado en la conferencia y yo no lo conocía, su trabajo estaba acompañado por (1) una carta de John Wheeler urgiendo fuertemente a que lo aceptase, y (2) un escrito de Wheeler evaluando las ideas de Everett. Como Wheeler había sido un participante activo de la conferencia y

como el artículo de Everett parecía ser relevante a los temas de la conferencia, estuve de acuerdo en incluirlo».

[246]. Los problemas con que se encontró Everett se describen en Barret y Byrne, eds. (2012). También se reproducen en esta obra todos los escritos, publicados o no, de Everett relacionados con este tema, incluyendo correspondencia.

[247]. Explicaciones más detalladas de la teoría de Landau aparece en Landau y Lifshitz (1991: cap. XVI).

[248]. Los tres compartieron el Premio Nobel de Física en 1972.

[249]. Josephson (Universidad de Cambridge) obtuvo el Premio Nobel de Física de 1973, compartido con el japonés Leo Esaki y el noruego nacionalizado estadounidense Ivar Giaever, que recibieron la mitad «por sus descubrimientos experimentales relativos a los fenómenos de efecto túnel en, respectivamente, semiconductores y superconductores». Josephson recibió la otra mitad, «por sus predicciones teóricas de las propiedades de una supercorriente a través de una barrera de túnel, en particular aquellos fenómenos que se conocen generalmente como efectos Josephson».

[250]. Hasta entonces, el superconductor de temperatura más elevada era una aleación de niobio y germanio, que se hacía superconductor a una temperatura de 23 K.

[251]. Ver, asimismo, Müller y Bednorz (1987).

[252]. Como su nombre indica, y aunque ciertamente no es una definición que en principio ilustre mucho, un semiconductor es un material que conduce la electricidad en un rango entre el que caracteriza a un metal y a un aislante. La conductividad de los semiconductores, como en el caso del silicio, es pequeña a temperaturas bajas y medias y, a diferencia de los metales, aumenta con la temperatura: Pero el valor de la conductividad puede ser muy mejorado si se les añade pequeñas cantidades de determinadas impurezas (esto permite que el silicio se utilice en transistores, rectificadores y circuitos integrados).

[253]. Para más información acerca de la historia de la física del estado sólido, ver los diferentes trabajos incluidos en Hoddeson, Braun, Teichman y Weart, eds. (1992).

[254]. Esta aproximación fue refinada posteriormente por el ruso Vladimir Fock (1930), en lo que se conoce como «aproximación de Hartree-Fock». La historia de esta aproximación se reconstruye en Gavroglu y Simões (2012: cap. 3).

[255]. En 1933 Bloch emigró a Estados Unidos, donde se afincó definitivamente realizando contribuciones tan destacadas como la de la resonancia magnética nuclear, por la que recibió, junto al estadounidense Edward M. Purcell (que llegó al mismo hallazgo de manera independiente), el Premio Nobel de Física de 1952.

[256]. Ver Bloch (1980).

[257]. Sobre el desarrollo de la teoría de bandas, ver Hoch (1992).

[258]. La teoría de Bloch fue aplicada para calcular la energía de bandas en diversos tipos de materiales cristalinos por los grupos de Eugene Wigner en Princeton y de John Slater en el MIT.

[259]. El «efecto Hall clásico» (la aparición de un voltaje transversal en un metal, cuando se hace pasar por él una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético) fue observado por Edwin H. Hall en 1879, en el curso de sus investigaciones para doctorarse en la Universidad Johns Hopkins (Baltimore, Estados Unidos). Peierls llegó a ser uno de los principales científicos en el campo de la física del estado sólido; su libro Quantum Theory of Solids (Peierls 1955), se convirtió en un clásico. Ver, asimismo, Peierls y Kojevnikov (1999).

[260]. En 1933 se publicó el célebre artículo de Arnold Sommerfeld y Hans Bethe (1933), «Elektronentheorie der Metalle», en el que «se calculaba casi todo lo que se podía calcular» (Mott 1988: 244). Este trabajo pronto pasó a conocerse como la «biblia del estado sólido».

[261]. A continuación sigo el análisis de Sánchez Ron (2007 a: cap. 11).

[262]. Mientras que antes de la guerra era difícil obtener silicio con niveles de impureza menores que el 1 por ciento, después, la compañía DuPont producía silicio 99,999 por ciento puro. También alcanzó un gran desarrollo la tecnología para dopar silicio y germanio con elementos de la tercera y quinta columna de la tabla periódica de los elementos (como el boro y el fósforo) para producir lo que se denomina semiconductores tipo-p y tipo-n. Explicaré enseguida qué son estos tipos de semiconductores.

[263]. Citado en Hoddeson (1981: 52).

[264]. Más detalles sobre el desarrollo del transistor, en Hoddeson (1981), Eckert y Schubert (1991), Riordan y Hoddeson (1997) y Riordan, Hoddeson y Herring (1999).

[265]. En español también se han utilizado otros nombres para el point-contact transistor, como «transistor de punto de contacto».

[266]. Consultado en internet; página «How the transistor got its name».

[267]. Sparks y Teal eran químico-físicos de los Laboratorios que mejoraron las técnicas de crecimiento y produjeron cristales de germanio dopados. Previamente a la presentación, Shockley había publicado un largo memorándum en la revista de los Laboratorios, Bell System Technical Journal, en el que pasaba revista al campo de los transistores, avanzando también ideas que tenían que ver con el nuevo transistor que entonces estaba desarrollando (Shockley 1949). Y también antes, apareció el que se convirtió en un clásico de la literatura electrónica: el libro de Shockley (1950), Electrons and Holes in Semiconductors, with Applications to Semiconductors.

[268]. Es oportuno recordar en este punto lo que ya señalé en el capítulo segundo: que entre 1950 y 1960 las ventas anuales de los productos electrónicos destinados al público no aumentaron, mientras que las de productos electrónicos para los servicios militares crecieron un 650 por ciento (en dólares constantes).

[269]. En la década de 1960, el porcentaje era del 80 por ciento; la guerra de Vietnam, con las desilusiones y críticas que suscitó, hizo que esa proporción bajase al 50 por ciento a mediados de los años 70, aunque posteriormente se superase esa fase, encontrándonos en la década de los 80 con que el I+D militar correspondía a aproximadamente el 70 por ciento de un presupuesto federal para I+D que rondaba los 57.000 millones de dólares.

[270]. Estas cifras proceden del Foreign Policy Institute de la Universidad Johns Hopkins. Una crítica de la Iniciativa de Defensa Estratégica se encuentra en Lichtenberg (1989).

[271]. Una excelente historia de lo que sigue, es la de Thomas Reid (2001).

[272]. El difícil carácter de Shockley tuvo también bastante que ver con que

Bardeen abandonase los Laboratorios Bell y se fuese a la Universidad de Illinois. Especialmente desde 1950, cada vez que Bardeen intentaba participar en los trabajos para desarrollar el transistor de unión se encontraba con la oposición de Shockley. Su situación se hizo todavía peor cuando decidió dedicarse al campo de la superconductividad, dominio en el que no encontró ningún apoyo en los Laboratorios, teniendo que trabajar en solitario. Aunque se le ofreció un aumento de salario, en 1951 aceptó la oferta de la Universidad de Illinois. Sobre Bardeen, véase Hoddeson y Daitch (2002).

[273]. Chip es una antigua palabra inglesa, que quiere decir «un pequeño, y especialmente delgado, trozo de madera, piedra u otro material, separado al labrarlo, cortarlo o romperlo».

[274]. El silicio es el segundo elemento químico más abundante en la Tierra, se encuentra en muchas rocas y en la arena y, según las condiciones a las que esté sometido, puede alterarse su conductividad, pudiendo desempeñar funciones electrónicas diferentes.

[275]. Finalmente, se le adjudicó a Kilby.

[276]. La reunión tuvo lugar en el California Institute of Technology, donde Feynman trabajaba y se publicó (Feynman 1960) en Engineering and Science, una revista cuatrimestral fundada en 1937 por la Oficina de Relaciones Públicas de Caltech para promover el interés por la ciencia.

[277]. Página web de la Fundación Nobel. Ver, asimismo, Freundlich (1963).

[278]. Otro tipo de microscopio electrónico es el de barrido, en el que el haz de electrones, más estrecho que el que se utiliza en el microscopio de transmisión, va recorriendo la superficie de la muestra.

[279]. Las microondas, recordemos, son ondas electromagnéticas de longitud de onda entre 1 metro y 1 milímetro.

[280]. Townes conocía el trabajo de Weber. Sobre otros pioneros del máser-láser, véase Hecht (1992).

[281]. Aunque el primer máser utilizaba un gas de amoniaco, hay máseres y láseres de otro tipo: de estado sólido (como el de rubí que desarrolló Maiman), molecular (el máser de hidrógeno), gaseosos (como el máser de rubidio o el laser

de helio-neón), químicos, de colorante, de semiconductores, de electrones libres. El máser de amoniaco tenía unas cuantas limitaciones que son típicas de los máseres y láseres de gases, incluyendo poderes de amplificación no muy grandes. Los de estado sólido tienen un mayor poder de amplificación, pero en la actualidad domina el uso de los de estado sólido (de arseniuro de galio, de tipo cascada).

[282]. Siegbahn lo recibió por sus aportaciones al desarrollo de la espectroscopía electrónica de alta resolución. Nicolas Bloembergen, un holandés que en 1946 se afincó en Estados Unidos, también aportó mucho al desarrollo temprano del máser e influyó con sus ideas en la dirección que tomaron los trabajos de Townes hacia el láser. Ver Myers y Dixon (2003).

[283]. Para más detalles sobre la invención del máser y láser, así como de su conexión con los militares, ver Bromberg (1991), Seidel (1987), Forman (1992, 1996) y Lamb, Schleich y Scully (1999).

[284]. No son menos importantes, algunas aplicaciones de los láseres en la investigación científica. Por ejemplo, su utilización en espectroscopía: al ser radiaciones monocromáticas de gran energía es posible dirigirlas con precisión a niveles atómicos determinados; los resultados obtenidos permiten conocer mucho mejor las propiedades de las moléculas, cuya estructura las hace mucho más complicadas de estudiar que los átomos. De hecho, la óptica cuántica fue una especialidad que nació a partir del láser, aunque el experimento seminal del campo fue anterior al láser; se debió a R. Hanbury Brown y P. Q. Twiss (1954), quienes midieron el diámetro de una radiofuente observando las fluctuaciones de su intensidad; lo que demostraron es que se podía inferir el grado de coherencia entre dos puntos de un campo de radiación a partir de las correlaciones de intensidad de dos antenas de radio (Brown trabajaba en el Observatorio de Jodrell Bank y Twiss en los Services Electronic Research Laboratories). Digno de mencionar también son los trabajos (1985) de Steve Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William Phillips que desarrollaron técnicas para atrapar y enfriar átomos utilizando láseres.

[285]. Cable constituido por finas hebras (hilos) de vidrio o de ciertos plásticos transparentes —un cable típico contiene 100 o más fibras— por el que viajan señales electromagnéticas (que puede ser luz láser) con muy poca pérdida de potencia, y que permite transmitir millones de comunicaciones simultáneas a gran distancia y con gran velocidad.

[286]. Como se sabe, las señales digitales son preferibles porque con ellas es más fácil realizar operaciones como codificarlas, limpiar ruidos de fondo, comprimirlas, almacenarlas o reproducirlas. Para convertir, digitalizar, señales analógicas en digitales, hay que tomar muestras poco espaciadas de las señales, de modo que puedan utilizarse para producir una réplica aparentemente perfecta, esto es, aparentemente continua. El mecanismo principal para lograrlo es realizar de forma periódica medidas de la amplitud de la señal analógica de partida y redondear sus valores a un conjunto finito de niveles preestablecidos de tensión, registrándolos como números enteros en algún tipo de memoria o soporte. Las técnicas digitales fueron posibles gracias a unos desarrollos que tuvieron lugar en la lógica matemática. El pionero en ese campo fue el inglés George Boole (1815-1864), que buscó nada más y nada menos que «las leyes del pensamiento», para lo cual introdujo unas estructuras matemáticas, denominadas en honor suyo «álgebras de Boole» que se fundamentan en las operaciones lógicas básicas: «y», «o», «no», «sí». Para ello, no necesitaba recurrir más que a dos números, el 0 y el 1. Ver Boole (1854).

[287]. La televisión ha sido otro de los medios de telecomunicación que también ha evolucionado. Y uno de los cambios más notables ha sido el de hacerse también ella digital. En España, el denominado «apagón analógico» se produjo el 3 de abril de 2010, momento en el que la televisión pasó a ser digital. Son varias las formas de recibir la televisión digital, sistema al que se están pasando, en un movimiento imparable, la mayor parte de los países: la Televisión Digital Terrestre (TDT), por cable, por satélite o a través de Internet. Al necesitar de antenas para recibir señales, la TDT recibe tantos canales como acepte la antena, y estos son mucho menos que con los otros sistemas (como vimos, los cables de fibra óptica pueden transportar millones de transmisiones, de televisión entre ellas).

[288]. Un «paquete» consta de dos partes: los datos propiamente dichos y la información de control, que indica la ruta a seguir a lo largo de la red hasta el destino del paquete.

[289]. Antes ya había tenido un primer contacto con el CERN, cuando en 1980 pasó allí seis meses. Durante ese tiempo escribió un programa, para su uso personal, titulado «Enquire», relativo al almacenamiento de información y cómo establecer links (conexiones) con facilidad.

[290]. El primer proyecto que desarrollaron Berners-Lee y Cailliau fue poner el

listín telefónico del CERN en una página web. La iniciativa y logro fueron aceptados rápidamente por el personal del CERN, que solía mantener abierta una ventana en sus ordenadores con ese listín electrónico.

[291]. La propuesta se puede consultar en http://info.cern.ch («Tim Berners-Lee's proposal»; reproducida en Berners-Lee 2000). El director del departamento que recibió la información, Mike Sendall, anotó en la propuesta: «Vague but exciting...» («Vaga, pero excitante...»).

[292]. En 1994, Berners-Lee creó el World Wide Web Consortium, destinado a mantener estándares comunes en el funcionamiento de la Red.

[293]. Una excelente, y enciclopédica, exposición del mundo nuclear es Atkins (2000). Ver, asimismo, Badash (2009).

[294]. Entre 1963 y 1980, Estados Unidos realizó unas 400 pruebas subterráneas, y la Unión Soviética 300. En 1974, ambos países acordaron limitar la potencia de las pruebas a 150 kilotones (1 kilotón es una unidad de energía equivalente a la cantidad de energía liberada en la explosión de 1.000 toneladas de TNT).

[295]. En total, Estados Unidos ha realizado 942 pruebas nucleares, de las que 725 han sido subterráneas, 203 en la atmósfera, 9 en el espacio y 5 submarinas.

[296]. La creación de la Agencia Internacional de Energía Atómica fue un derivado del Programa «Átomos para la Paz» que el presidente Eisenhower planteó el 8 de diciembre de 1953 en una reunión de la Asamblea General de la ONU. Aquella intervención dio lugar a la celebración, en agosto de 1955, de la Conferencia sobre los Usos Pacíficos de la Energía Atómica de Ginebra, con la asistencia de 1.500 delegados, que presentaron más de 1.000 comunicaciones. Entre el 27 de febrero y el 18 de abril de 1956, y cumpliendo un mandato de la anterior conferencia, representantes de doce países (Estados Unidos, Unión Soviética, Gran Bretaña, Francia, Canadá, Bélgica, Portugal, Sudáfrica, Checoslovaquia, Brasil, India y Australia) se reunieron en Washington para planear la creación de la agencia que el presidente norteamericano había propuesto en 1953. En octubre, tuvo lugar otra reunión con el mismo fin, en la sede de la ONU en Nueva York, pero esta vez con la participación de delegados de 81 naciones. Finalmente, el 1 de octubre de 1957 la ONU estableció la International Atomic Energy Agency, con sede en Viena. La misión que se le

asignó fue promover la difusión de los usos pacíficos de la energía nuclear y controlar el desarrollo de las armas atómicas, tareas que, ya inmersos en el siglo XXI, continúa intentando realizar, no sin numerosas dificultades, debido a la fuerte carga política de sus objetivos. A lo largo de su ya medio siglo de existencia, la IAEA ha tenido que afrontar situaciones muy difíciles; una de ellas fue cuando aviones de la Fuerza Aérea de Israel bombardearon, el 7 de junio de 1981, la planta nuclear iraquí (Centro Nuclear de Tammuz) en construcción en El-Tuwaitha, en las afueras de Bagdad; la Junta de Directores de la Agencia expulsó entonces a Israel de la organización, lo que originó la amenaza por parte de Estados Unidos de suspender sus pagos, siendo Israel, como consecuencia, readmitida. Tras la Guerra del Golfo, en 1991, los inspectores de la IAEA declararon que Irak estaba realizando trabajos secretos destinados a fabricar armamento atómico; a partir de entonces, la Agencia se vio envuelta en una complicada tarea de inspecciones en la que se enfrentaban maniobras y tácticas enfrentadas del presidente iraquí, Saddam Hussein (1937-2006), y del gobierno de Estados Unidos, que condujeron a la guerra e invasión de Irak, ordenada por el presidente Bush. A mediados de la década de 1990, la agencia supervisaba más de 800 instalaciones nucleares a lo largo y ancho del planeta. Sobre la historia de la Agencia Internacional de Energía Atómica, véase Fischer (1997).

[297]. Bernstein (2008: 274). La lista de las primeras pruebas nucleares realizadas por estos países es la siguiente (entre paréntesis el nombre): Estados Unidos, 1945 («Trinity»); Rusia/Unión Soviética, 1949 («RDS-1»); Francia, 1960 («Gerboise Bleue»); Reino Unido, 1952 («Hurricane»); China, 1964 («596»); India, 1974 («Smiling Budha»); Paquistán, 1998 («Chagai-I»); Corea del Norte, únicamente se sabe que el 12 de febrero de 2013 anunció que había realizado una prueba subterránea, la tercera en siete años. De Israel no se tienen datos.

[298]. Las grandes potencias han dispuesto, y disponen, de submarinos nucleares, todos, probablemente, provistos de misiles con cabezas nucleares. Y se han producido algunos accidentes, especialmente de la Unión Soviética. En 1970, uno de la clase K-8 sufrió un accidente en la bahía de Vizcaya perdiendo la vida 50 miembros de su tripulación. El 10 de agosto de 1985, en la bahía de Chazhma, cerca de la ciudad siberiana de Dunay, una reacción en cadena incontrolable en el reactor de un submarino de la clase K-431 produjo una explosión que acabó con la vida de 10 hombres que se encontraban en la sala del reactor, mientras que alrededor de 290 personas se vieron expuestas a la radiación, y productos radiactivos se dispersaron por medio de las corrientes

marinas en el océano. También está el accidente del K-219, ocurrido en octubre de 1986, provisto de dos reactores nucleares, 16 misiles y 34 cabezas nucleares, que se hundió a 725 kilómetros de las Bermudas. Una pequeña fuga en uno de los misiles produjo una explosión cuando agua salada se mezcló con el combustible del misil, produciendo ácido nítrico. Murieron inmediatamente cuatro miembros de la tripulación y después dos más por problemas de salud. El K-219 continúa en el fondo del océano Atlántico, aunque sus misiles han sido extraídos por la Marina estadounidense. Actualmente hay ocho submarinos nucleares hundidos.

[299]. Citado en Rhodes (1993: 36-37).

[300]. Los problemas de la industria nuclear civil estadounidense se debieron a un conglomerado de razones, entre las que figuran graves errores en la estimación del aumento de la demanda de energía eléctrica (el embargo de petróleo de 1973 tuvo como una de sus consecuencia la de, al subir los precios, reducir el consumo); un absolutamente exagerado optimismo sobre la naturaleza de las dificultades tecnológicas a encontrar, o el, ya aludido, cambio en la sensibilidad medioambiental del público.

[301]. Las consecuencias para la energía nuclear del desastre japonés fueron inmensas. En julio de 2011, el primer ministro de Japón abogó en un discurso por la paulatina eliminación de las cincuenta centrales nucleares de su país, a pesar del problema que esto significaría, ya que el 34,5 por ciento de la electricidad que se consume en Japón procede de esta fuente; en efecto, el 5 de mayo de 2012 se cerraba la última central en funcionamiento. (Sin embargo, tres años después —abril de 2014—, Japón está reconsiderando esta postura de cierre total, por las dificultades de suministro de energía, planteándose reabrir algunas centrales con la seguridad mejorada). En mayo de 2011, el Bundestag (Parlamento) alemán había aprobado, por mayoría, abandonar por completo el uso de centrales nucleares en 2020 a más tardar; poco después, en septiembre, el grupo Siemens AG anunció que abandonaba el negocio de las centrales nucleares. En Australia no existe ninguna central. Otros países no siguen esta línea: así, Rusia ha hecho planes para incrementar el número de sus reactores (en 2010 tenía 32) a 59, manteniendo y actualizando los viejos. China (15 centrales en 2010) e India (20 centrales en 2010) también están construyendo nuevas centrales. Francia, que posee 59 centrales nucleares en funcionamiento, que producen más del 78 por ciento de la electricidad que consume, no parece estar dispuesta a abandonar la energía nuclear. El 17 de febrero de 2010, el presidente

Barack Obama anunció la construcción de dos nuevas centrales nucleares en el estado de Georgia, las primeras en construirse en Estados Unidos en treinta años. En España, las seis centrales con ocho reactores (dos de ellas, Almaraz y Ascó, con dos reactores) que existían en 2011 producían el 19,64 por ciento de la energía eléctrica consumida en el país.

[302]. Existe un tipo de reactor nuclear, de «segunda generación», los denominados «reproductores» (breeders), que, en principio, reducen el problema de los residuos radiactivos, al poder procesarse estos, disminuyendo su poder radiactivo, y que ofrecen, al mismo tiempo, una mayor longevidad del combustible. En un reproductor el combustible fisionable, uranio 233 o plutonio 239, se quema en el núcleo del reactor. Este núcleo está rodeado de torio 232 o uranio 238 no fisionables y muy abundantes en la naturaleza, que cuando capturan neutrones se transforman en uranio 233 o plutonio 239 fisionable, con lo que comienza un nuevo ciclo. En un reproductor se podría, en principio, llegar a utilizar el uranio y torio de las rocas graníticas. En este sentido, se dispondría de una fuente casi inagotable de combustible, al igual que el deuterio del mar para reacciones termonucleares controladas (reactores de fusión, aún no disponibles). Pero sigue pendiente el problema de los residuos. Los defensores del reprocesado argumentan que el residuo líquido de productos radiactivos que se obtiene utilizando los reactores reproductores tiene una vida media mucho menor (alrededor de seiscientos años) que la del plutonio y uranio sin procesar, cuyas vidas medias alcanzan las decenas de miles de años, lo que implica, al estar fuera de toda escala de experiencia humana, que la solución ahora practicada de enterrarlos es poco aceptable. Pero aun así, es obligado reconocer que seiscientos años tampoco son poca cosa, y es que para manejar propiamente la energía nuclear se necesita, por parte de las instituciones sociales, una vigilancia y una longevidad a las que no estamos acostumbrados. La escala temporal de los desechos nucleares no parece corresponder a la de las instituciones humanas. En diciembre de 1996, únicamente existían cinco reactores reproductores: dos en Francia, y uno en, respectivamente, Japón, Kazajistán y Rusia. Como se ve, por diferentes razones, no han proliferado mucho.

[303]. Aunque aquí hago hincapié en el papel de la física en las ciencias biomédicas, estas también han ayudado al desarrollo de aquella. Como señalaron acertadamente Hans Frauenfelder, Peter Wolynes y Robert Austin (1999: S419): «La conexión entre biología y física es una calle de dos sentidos. Sin embargo, el grueso de tráfico ha ido en un sentido. Muchas herramientas de la física han sido

adoptadas por investigadores de las ciencias biológicas. El tráfico de vuelta, en el que ideas biológicas motivan consideraciones físicas, ha sido menos visible, pero el estudio de los sistemas biológicos ya ha conducido a algunos resultados interesantes, particularmente relativos a la física de la complejidad y de los sistemas desordenados».

[304]. Los cortes tomográficos son imágenes de secciones de objetos anatómicos obtenidas mediante algún tipo de onda y reconstruidas mediante ordenador en planos no transversales.

[305]. El texto de la conferencia se puede consultar en la página web de la Fundación Nobel.

[306]. La ayudante (y coautora) que acabo de mencionar llegaría, de hecho, a ser mucho más célebre en el dominio de la ciencia que Bernal, aunque con su nombre de casada: Dorothy Crowfoot Hodgkin. Cuando recibió, en 1964, el premio Nobel de Química, la Academia Sueca de Ciencias distinguió especialmente sus contribuciones a la determinación de la estructura de la penicilina y de la vitamina B12.

[307]. He tomado esta cita, al igual que las siguientes, de Olby (1991: 383-384), quien a su vez las tomó de Perutz (1980).

[308]. En 1962 —el mismo año que la Fundación Nobel premió a Watson, Crick y Wilkins, en Medicina— Perutz recibió el premio Nobel de Química por sus «investigaciones sobre la estructura de proteínas globulares (en particular la hemoglobina)». Lo compartió con otro investigador del Cavendish, John C. Kendrew (a quien el propio Perutz había enseñado los fundamentos de la cristalografía), que lo recibió por «la determinación de la estructura de la mioglobina».

[309]. «La noción de biología de Bohr», ha explicado Ute Deichmann (2007:5-6), «contrastaba de forma notoria con las opiniones que había defendido con energía a finales del siglo XIX Jacques Loeb, un biólogo y bioquímico germano-americano. Loeb afirmaba que los fenómenos de la vida se pueden explicar mediante métodos físicos y químicos, y que los biólogos tenían que utilizar y desarrollar más estos métodos si querían trabajar de manera científica. Ya en 1910, Loeb impulsó los primeros experimentos de asociar (pero no igualar) genes y enzimas. Como se demostró algunos años después, no se cumplieron las

esperanzas de Bohr, de que en la biología se encontraran leyes completamente diferentes de las de la física. En su lugar, el programa "mecanicista" de Loeb culminó con la teoría de Watson y Crick de la estructura en doble hélice del ADN, en la que la "complementariedad" resultó ser un concepto enteramente químico: el emparejamiento específico de las cuatro bases del ADN, a través de fuerzas débiles de enlaces de hidrógeno, de acuerdo con su estructura química».

[310]. Ya instalado (1937) en Estados Unidos, en Caltech, Delbrück se dedicó a estudiar los genes recurriendo a los virus bacterianos, o fagos. Aunque los fagos son demasiado pequeños para observarlos con un microscopio ordinario, estructural y químicamente son muy sencillos (mitad proteínas, mitad ADN), están dotados de una gran capacidad de autorreproducción (los fagos fueron descubiertos en 1915-1917 por Frederick William Twort y Félix d'Hérelle). Junto a Emory Ellis, Delbrück demostró que un fago que infecta a una célula puede dar lugar a cientos de fagos idénticos en media hora, con lo que se convertían en extraordinarios instrumentos para estudiar la replicación genética (Ellis y Delbrück 1939). Dos años después, se encontró con Salvador Luria y Alfred Hershey, dando lugar al conocido como «Grupo de los Fagos», cuyos miembros estaban unidos por un deseo común: resolver el misterio del gen. Es interesante también mencionar que en 1947, Luria, entonces profesor en Indiana, tomó como estudiante graduado a un joven biólogo de Chicago, de nombre James Watson, iniciándole como miembro del Grupo de los Fagos.

[311]. Las circunstancias de la elección de Schrödinger se explican en Moore (1989: 394-395).

[312]. Otro dato relevante es que Watson asistió, en noviembre de 1951, a un seminario de departamento que Franklin dio en el King's y en el que habló de los trabajos que estaba emprendiendo.

[313]. Franklin publicó sus fotografías después de que hubiese aparecido el artículo de Watson y Crick (1953): Franklin y Gosling (1953). Raymond Gosling era un estudiante graduado del King's que trabajó con ella.

[314]. El papel detallado de la relatividad en el GPS se explica en Ashby (2002).

[315]. El conocimiento de la estructura de la Tierra, que utilizaron los científicos que menciono en esta sección, se basó en parte en trabajos de físicos

como Pierre Curie y el alemán instalado posteriormente en Estados Unidos, Walter Elsasser. Curie (1895) descubrió que cuando se calienta un material ferromagnético por encima de cierta (y elevada) temperatura —ahora llamada «punto de Curie»— pierde por completo su imanación permanente (recíprocamente, si se le enfría partiendo de una temperatura superior a la del «punto de Curie», logra una intensa y permanente imanación en la dirección del campo magnético terrestre, un fenómeno denominado «termorremanencia»). Por su parte, Elsasser (1939) fue el primero en proponer, en 1939, que el magnetismo terrestre se debe a corrientes termoeléctricas en el núcleo líquido terrestre, que se producen debido a la existencia de fuentes radiactivas de calor. Tras detener sus investigaciones por causa de la guerra, en 1946 Elssaser volvió a este campo, desarrollando más sus trabajos anteriores, encontrando finalmente que su teoría predecía la aparición de cambios seculares en el campo magnético terrestre. Estos resultados fueron básicos en el camino que condujo a la ya citada teoría de la tectónica de placas.

[316]. Los trabajos de Blackett y Bullard como geofísicos, se tratan en Good (2010).

[317]. Es interesante mencionar algo que explicó Morley referente a su educación y a las dificultades que entonces los geólogos tenían con la física. Morley comenzó a estudiar matemáticas y física en 1938, pero enseguida, en su segundo año, pasó a cursar física y geología. «Pronto me di cuenta», señalaba (Morley 2003: 68-69), que «este curso pretendía ser un experimento interdisciplinar y que solamente nos habíamos matriculado dos estudiantes, habiendo existido únicamente un estudiante graduado en los últimos seis años, J. Tuzo Wilson, que después fue mi supervisor de tesis y uno de los miembros del grupo que produjo la teoría y el nombre de tectónica de placas.» También se dio cuenta enseguida del «gran golfo que existía entonces entre la mente de un geólogo y la de los físicos. Estos consideraban inferior a la geología, viéndola como un campo descriptivo y cualitativo que no era realmente una ciencia, y los geólogos pensaban que los físicos eran "cabezas de huevo" que no vivían en el mundo real. No hace falta decir que los dos grupos tenían dificultades para comunicarse profesionalmente entre sí. El curso de física y geología fue establecido de manera que la mitad de mis clases se daban en el Departamento de Geología y la otra mitad en el Departamento de Física. Pasarían algunos años hasta que me diese cuenta de cómo unir ambos campos, tan diferentes eran sus culturas. A lo largo de mi carrera, este entrenamiento interdisciplinar me proporcionó el hábito de leer la nueva bibliografía de ambas disciplinas, algo

que, me doy cuenta retrospectivamente, me permitió idear la hipótesis que explicaría la configuración cebra». La «configuración cebra» a la que se refería es la alternancia del sentido de la imanación remanente en las rocas que aparecen en las fronteras que separan placas tectónicas.

[318]. Los datos que ofrezco aquí sobre el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas son muy fragmentarios. Para más información, consultar, por ejemplo, el magnífico resumen de Frankel (2009).

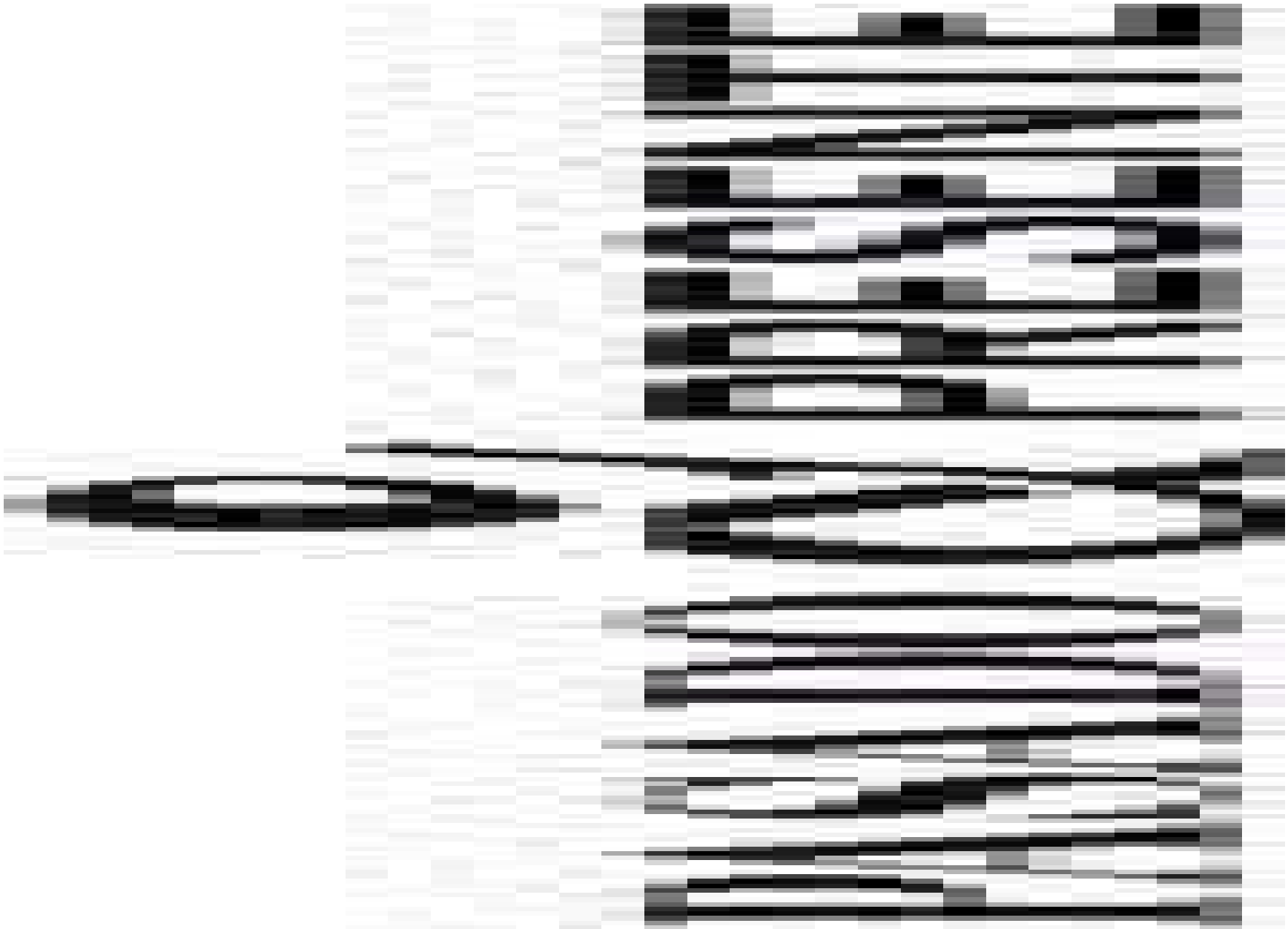
[319]. Para más información sobre estos puntos, véase Schneider y Sagan (2008).

[320]. En realidad, la frase original es algo diferente a la tan repetida «el aleteo de una mariposa en Brasil puede producir un tornado en Texas», puesto que Lorenz escribió: «Predictibilidad. ¿El aleteo de una mariposa en Brasil produce un tornado en Texas?». Apareció como el título de la primera sección de una conferencia dictada el 29 de diciembre de 1972 en una sesión dedicada al Programa de Investigación Atmosférica Global dentro de la 139ª Reunión de la American Association for the Advancement of Science. Se distribuyó en una nota de prensa y solo se publicó bastantes años más tarde, en 1993, como un apéndice a un libro que Lorenz escribió, titulado The Essence of Chaos (La esencia del caos; Lorenz 1995). Antes, sin embargo, había adquirido ya celebridad, a través, sobre todo, de un libro que fue un éxito de ventas: Chaos: Making a New Science (Caos: La creación de una nueva ciencia), de James Gleick (1987), cuyo primer capítulo se titula «El efecto de la mariposa».

[321]. Se trata del denominado «límite», o «frontera K-T», donde la letra K proviene del término alemán Kreide, que significa «creta» y el nombre del Cretácico, proviene del término latín que significa «creta», una forma de caliza.

[322]. Recordemos a este respecto que en julio de 1994, se pudo observar desde la Tierra, con la ayuda de telescopios, el choque espectacular de algunos fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9 contra la superficie de Júpiter.

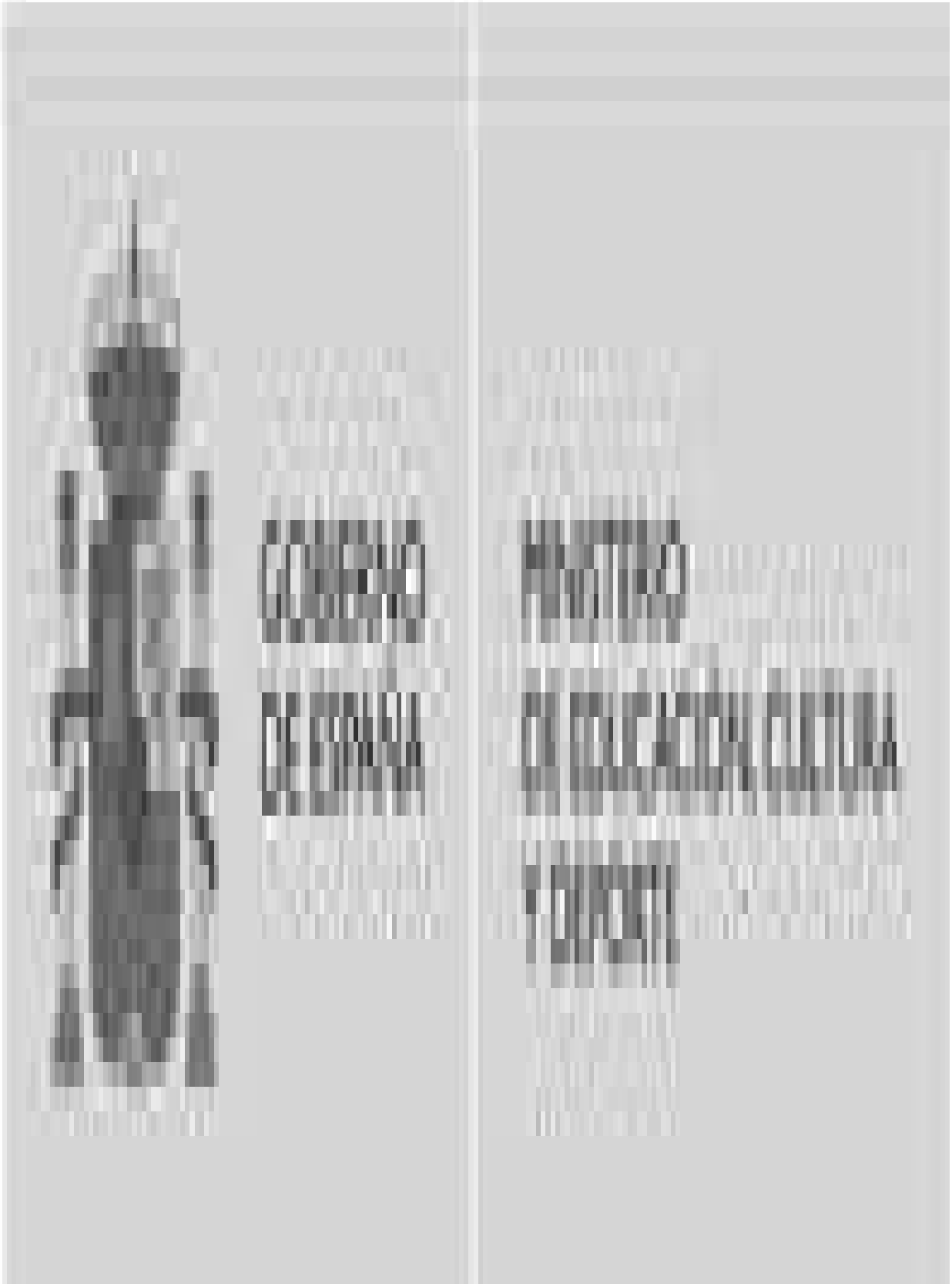
[323]. Sobre este tema, consultar Weatherall (2013) y Pimbley (1997).



Esta obra ha sido publicada con una subvención de la Dirección General del Libro, Archivos

y Bibliotecas del Ministerio de Cultura, para su préstamo público en Bibliotecas Públicas, de

acuerdo con lo previsto en el artículo 37.2 de la Ley de Propiedad Intelectual.



Los derechos originales de esta obra pertenecen a:

© 2014, José Manuel Sánchez Ron

Los derechos exclusivos de publicación en lengua castellana pertenecen a:

© Ediciones de Pasado y Presente, S.L., 2014

Pau Claris, 147, 4º, 1ª, 08010 Barcelona

ediciones@pasadopresente.com

www.pasadopresente.com

Esta primera edición de El mundo después de la revolución ha sido compuesta en tipos Fournier por Víctor Igual, S.L. Gonzalo Pontón ha realizado la corrección de pruebas y Atona, S.L. ha coordinado la realización de la obra. Se ha impreso sobre papel neutro de 80 g y encuadernado en tapa dura con sobrecubierta por Novoprint. El 15 de octubre de 2014 fue puesta a la venta a través de la distribuidora UDL

ISBN: 978-84-943-139-0-5

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede realizarse con la autorización de sus titulares salvo en las excepciones que determina la ley. Si necesita fotocopiar o escanear fragmentos de esta obra, diríjase al Centro Español de Derechos

Reprográficos (CEDRO) a través de la web www.conlicencia.com o mediante llamada telefónica al 91 702 19 70 o al 93 272 04 45